

工學碩士 學位論文

선박의 해수배관용 철강-현무암
복합재료 파이프에 관한 연구

A Study on Steel-Basalt Lined Composite Pipe
for Seawater Transportation in Vessel

指導教授 金 鍾 道

2006年 8月

韓國海洋大學校 大學院

機關 시스템 工學科

尹 熙 鍾

本 論 文 을 尹熙鍾의 工學碩士 學位論文으로 認准함

主 審 工學博士 王 之 錫



副 審 工學博士 李 明 勳



副 審 工學博士 金 鍾 道



2006年 8月

韓國海洋大學校 大學院

機關시스템工學科

尹 熙 鍾

목 차

Abstract

1. 서론	1
1.1 연구의 배경과 목적	1
1.2 종래의 연구 동향과 논문의 구성	4
1.2.1 용융주조 현무암에 대한 연구 동향	4
1.2.2 복합파이프에 관한 연구 동향	6
1.2.3 논문의 구성과 내용	12
2. 이론적 배경	15
2.1 천연 현무암의 특성	15
2.1.1 천연 현무암의 분류	15
2.1.2 천연 현무암의 기계적 물성	19
2.2 용융주조 현무암의 특성	22
2.2.1 현무암 원료의 지역별 특성	22
2.2.2 슬라파니(Slapany) 천연 현무암의 특징	30
2.2.3 슬라파니 용융주조 현무암의 결정화 특성	34
2.2.4 결정화 진행 과정	41
2.3 용융주조 현무암의 해수 중 내식성	47
2.3.1 해수의 일반적 부식 특성	47
2.3.2 용융주조 현무암의 해수 중 내식 특성	48
3. 사용재료 및 실험방법	49
3.1 사용재료	49
3.1.1 용융주조 현무암의 조성 및 물성	49
3.1.2 모르타르(mortar)의 조성 및 구비조건	54

3.2 실험방법	56
3.2.1 3점 굽힘시험	56
3.2.2 압축강도	58
3.2.3 내식성	60
3.2.4 경도	64
3.2.5 흡수율	66
3.2.6 비중	67
4. 실험결과 및 고찰	68
4.1 용융주조 현무암의 물성	68
4.1.1 3점 굽힘시험	68
4.1.2 압축강도	71
4.1.3 내식성	72
4.1.4 경도	74
4.1.5 흡수율 및 비중	75
4.2 복합재료 파이프 시제품의 제작과 그 특성	77
4.2.1 용융주조 현무암 튜브	77
4.2.2 복합재료 파이프	82
4.3 복합재료 파이프의 역학적 안전기준	86
4.4 복합재료 파이프의 열응력 특성	89
4.5 복합재료 파이프의 반경 방향별 온도분포	92
4.6 복합재료 파이프의 절연저항과 굽힘응력	97
5. 결론	101
참고문헌	104

A study on Steel-Basalt Lined Composite Pipe for Seawater Transportation in Vessel

Hee-Jong, YOON

**Department of Marine System Engineering
Graduate School of Korea Maritime University**

Abstract

In recent, the price of vessel have got higher and higher due to construct a large size, specific purpose and enforce the international rules of stability. So the vessels must be considered from the designing and building the vessel in the shipyard what is the best way to operate maximum ratio without trouble and repair.

The basic formation of this study is composed at first each characteristics of a natural basalt and fused cast basalt, re-crystallization of cast basalt and its properties, secondary the test way of fused cast basalt regarding compressive strength, bending strength, hardness, absorbtion and neutral salt spray test, thirdly the manufacturing process of fused cast basalt tube and bend, fourthly the way of inserting the liner in the steel tube and mortaring between steel casing and basalt liner, fifthly the characteristics of steel-fused cast basalt lined pipe regarding the safety standard of mechanics, thermal strength, temperature distribution of each cylinder wall, insulation test and bending strength.

Steel-fused cast basalt lined complex pipe is developed by inserting the

basalt tube inside of steel pipe to protect the corrosion and abrasion of steel pipe to transport seawater of vessel by protecting of direct touch seawater to steel. Also fused cast basalt tube have a high chemical resistance and anti-abrasion characteristics, so this pipe will be used without repair till to her whole life.

Mortar for sticking of tube and steel pipe is also important to decide the quality of complex pipe. Because steel pipe has a high toughness and strength also fused cast basalt has a very high corrosion and abrasion resistance, by complex together them.

This thesis have been studied to use seawater pipe line for the permanent material with economic point and environment.

To apply this composite pipe in the vessel, during the design and construction of vessel in shipyard it need a review the safety guard of moment and radius, temperature distribution factors of each materials which are steel, mortar and basalt liner, the heat stress due to it has a different heat expansion coefficient steel and basalt liner, insulation resistance to check the sea water flow out from the basalt liner and touch with the steel pipe, bending moment due to it has a heavy weight and need the support bar at the middle portion between distance line, and the test of impact on the basalt liner due to it has a brittle.

From the experiment and study, the application of steel-fused cast basalt tube at the sea water line will be expected to increase effective profit balance of vessel due to without charge of management and maintenance until her whole life.

1. 서 론

1.1 연구의 배경과 목적

선박의 기관실에는 다수의 파이프라인(pipe line)이 설치되어져 있다. 이들을 크게 나누어보면 해수, 청수, 연료유, 윤활유 그리고 압축공기 파이프 등으로 분류할 수 있다. 통상적으로 이들 파이프의 표면을 종류에 따라 색깔별로 도색하여 구분 짓고 있다. 즉 해수파이프는 녹색, 청수파이프는 청색, 연료유 계통은 적색, 윤활유계통은 황색, 압축공기계통은 회색 또는 은색이 도색되고 있다.

그런데 이들 파이프라인 중 해수파이프의 내면은 스케일(scale)의 침착(沈着)과 부식이 급격히 진행된다. 특히, 침착된 스케일은 화공약품에 의해 제거할 수 있지만, 부식은 선박의 수명주기 훨씬 이전부터 진행되기 시작하여 파이프의 각 부에서 해수가 누수 되기도 한다. 이 경우 운항중인 선박은 클램핑(clamping)이나 밴딩(banding)과 같은 임시조치를 취한 후, 정박이나 도크 수리 중 파이프를 수리나 제작·교환 한다. 그러나 선박 내 해수 파이프의 근본적인 방식조치를 취하지 않는 이상, 지속적인 수리와 교환이 필요하다.

더욱이 조선소에서 선박 의장 설계 시 해수라인의 배관은 선박의 수명주기 이전에 수리·교체할 것이라는 사실을 배려하지 않고 설계할 경우, 해수파이프라인의 배관 교체 업시 해수파이프 이외의 파이프도 분해해야 하는 번거러움이 있으며, 이는 보수 작업의 장기화로 인한 여러 가지 비용 상승을 초래한다. 특히, 이런 보수작업 동안은 선박의 운항을 중지해야 하는 비용까지 더해져 간접적인 비용부담이 증가하게 된다. 또한 시체스트(sea chest)를 비롯한 킹스톤 밸브(Kingstone valve)이전의 해수 파이프 라인은 선박을 도크(dock)에 올리지 않고는 교체할 수 없다는 난점도 있다.

이러한 점들을 고려해 볼때, 선박의 수명 주기까지 해수파이프가 부식되지 않는 내식성 소재의 개발이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 슬러리(slurry)의 침전을 방지하고 내식성을 가진 해수용 철강-용융주조 현무암 복합 파이프를

연구하고자 한다.

즉, 철강-용융주조 현무암 복합 파이프는 철강재 파이프의 내주면에 용융주조 현무암 주물을 삽입한 후, 중간층으로 모르타르(mortar)를 충전하여 내주면의 용융주조 현무암 라이너(liner)를 고정시킴으로 해수가 철강재에 직접 접촉하지 않도록 하는 것이다. **Fig. 1.1**의 90° 엘보우(elbow)와 직선형 파이프의 모식도에서 나타낸 것과 같이 철강재 파이프의 내주면에 용융주조 현무암 주물을 삽입하는 방식이다. 현무암은 섭씨 약 1,320~1,350℃ 부근에서 기본적으로 중요하게 보이는 입자들이 완전히 용융^[1]하므로, 이 온도로 가열하여 용융 시킨 후, 약 1,200℃ 부근에서 현무암을 파이프의 라이너로 주조하여 선박의 해수용 파이프에 사용하면, 선박의 수명 주기까지 해수파이프를 반영구적으로 사용할 수 있다는 장점이 있다. 이때 철강재 파이프와 현무암 파이프 사이의 모르타르 접착이 철강-현무암 복합재료 파이프의 품질을 결정하는 중요한 요소가 된다.

따라서, 기존의 철강 해수 파이프를 철강-용융주조 현무암 복합재료 파이프로 대체하여 파이프의 수명을 영구화함으로써, 러닝 코스트(running cost)의 저감과 제품의 품질 향상에 따른 경쟁력의 재고가 주 목적이다.

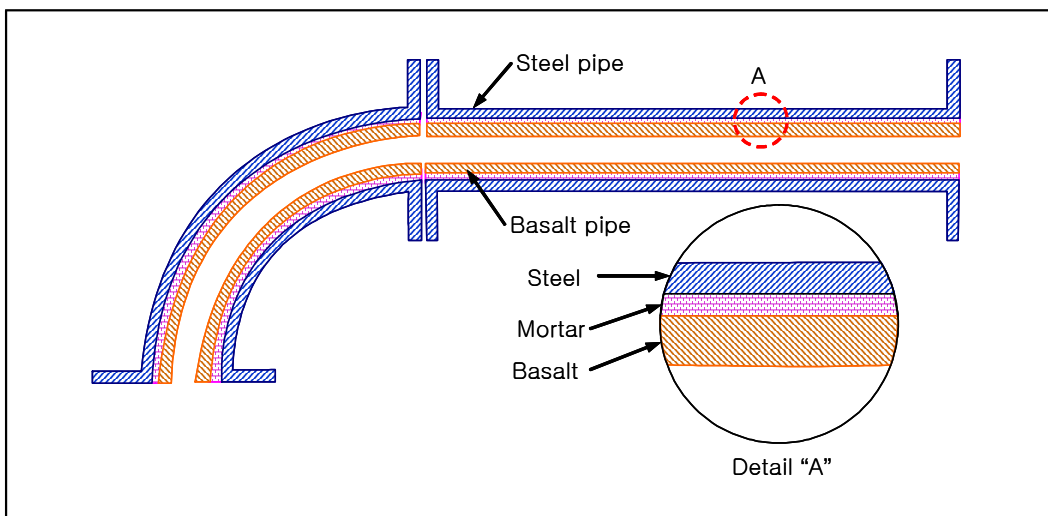


Fig. 1.1 Schematic illustration of steel-fused cast basalt lined composite basalt

1.2 종래의 연구 동향과 논문의 구성

내면을 따라 유동하는 이송물에 의한 마모와 부식을 방지하기 위한 연구로 내주면에 금속성 라이너 또는 비금속성 라이너를 갖는 복합파이프의 연구에 관한 국내·외 자료를 조사하고, 본 연구의 대상인 철강-용융주조 현무암 복합재료 파이프의 특성과 형상을 서로 비교하여, 용융주조 현무암이 지닌 재료적 특징을 검토하였다.

1.2.1 용융주조 현무암에 대한 연구 동향

상이한 미세구조와 특성을 지닌 글라스 세라믹(glass-ceramics)을 용융주조 세라믹(fusion cast ceramics)과 비교하면 가장 중요한 요소는 결정(crystallization)시 점도 조건이다. 여기서 주조 세라믹은 점도가 약 $10^3 \text{ dyne s/cm}^2 (\text{poise})$ 로 유동하는 특성을 지니며, 가공된 글라스의 핵과 결정은 10^8 dyne s/cm^2 이상으로 보통 $10^9 \sim 10^{12} \text{ dyne s/cm}^2$ 사이에서 생성된다^[1].

현무암을 용융하여 흑유리를 생산한 것이 용융주조 현무암의 시초이다. 이때 현무암의 용융주조 후, 열처리 냉각 시간의 일정한 변화에 따라 조직이 치밀하고 단단하게 재결정화(re-crystallization)된 용융주조 현무암과 표면이 매끄러우며, 검고 반사성이 우수한 유리성(glass) 현무암이 생성되는 것을 발견하였다.

재결정화된 용융주조 현무암의 경우 매우 경도가 높고 치밀한 구조를 가지고 있으며, 주조의 특성상 형상을 자유로이 만들 수 있다는 장점과 함께 대량생산이 용이하고, 내마모성·내식성이 요구되는 산업용 설비에 그 적용이 가능하게 되었다. 또한 유리화된 주조현무암 역시 장식품이나 생활용품으로 활용할 수 있다.

1777년 프랑스에서 세라믹 킬른 로(ceramic kiln furnace)를 이용하여 화산 현무암을 용융시켜 흑유리 도자기를 주조한 것이 용융주조 현무암의 첫 성공 사례이다. 그 후 1801년에 결정 구조의 흔적이 보이는 현무암을 용융 냉각하는 기술이 스코틀랜드에서 개발되었으며, 1837년에는 토형(土型) 거푸집에서 42kg

의 완전한 결정을 갖는 현무암질의 구체가 생산되었다.

결정화된 현무암질의 주조물 생산에 관한 첫 번째 특허가 1903년 프랑스에서 등록되었으며, 1918년 10ton/day의 생산량을 가진 결정화된 용융주조 현무암 주물 공장이 최초로 설립되어 대부분의 절연체 또는 내화학성 제품으로 생산되었다.

1928년 독일의 용융현무암공장(Schmelzbasaltwerk) 칼렌본(A.G. Kalenborn)이 용융주조 현무암 생산을 시작하였으나 채산성 문제로 중단하였으며, 그 후 10년 뒤에 생산을 재개 하였다. 다음으로 모스크바의 암석 공장에서도 1932년도에 생산을 시작하였다.

현재 세계 생산량의 65%를 차지하고 있는 체코 산의 산업용 내마모, 내식성 재결정화 용융주조 현무암의 생산 배경을 살펴보면 다음과 같다.

현무암의 용융성과 결정성에 관한 기술적인 개발은 1949년 체코 공화국의 하르텍 크라로베(Hardec Kralove)지방에 위치한 유리기술연구소(Glass Research Institute)에서 시작되었으며, 1950년 리토메리체(Litoměřice) 지역에 있는 리보코바니(Libochovany) 현무암을 이용한 기술적인 방법이 체코 공화국 두초브(Duchov)지역에 있는 유리 공장에서 시도되었으며, 1951년 스타라 보다(Stara Voda)에 위치한 새로운 주조 공장에서 본격적인 생산이 시작 되었다. 초기의 공장은 리보코바니 지역과 일시적으로는 슬로바키아의 노바 바다(Nova Bana)에 위치한 브레히(Brehy) 지역에서 채광된 현무암을 이용하였다. 이들 광산은 채광, 물류 및 기술개발비 등의 과도한 비용 부담으로 폐광 되었으며, 새로운 광산의 암석 원료가 필요하게 되었다. 그 후 원료의 원활한 공급이 어려워져 캡(Cheb) 지역의 슬라파니(Slapany) 광산의 현무암을 스타라 보다 공장에 원료로 공급하였으며, 이 원료는 수년간 지질학, 광물학 그리고 화학적 특성과 함께 그 품질이 연구되었다, 그 결과 재결정화 과정에서 우수한 품질, 풍부한 매장량 그리고 지리적으로는 스타라 보다 공장에서 30km에 불과한 우수한 광산 접근성으로 운반비용이 높지 않아, 그 경제성이 우수한 것으로 판명되어 지금까지 사용되고 있다.

체코 공화국 외에도 현무암 용융의 산업적인 기술은 중국, 독일, 북한, 폴란드, 러시아 및 슬로바키아에서 적용되고 있다. 이러한 활동에 있어 이전부터 관심을 표명한 곳은 아이슬랜드, 시리아, 일본 그리고 최근에는 요르단이 있다^[3].

1.2.2 복합파이프에 관한 연구 동향^[4]

(1) 금속성 라이너를 갖는 복합파이프 원주

금속성 라이너를 갖는 복합파이프의 경우, 니켈합금 등과 같이 내식특성을 갖는 금속성 라이너 또는 내관(內管)을 외관(外管)의 내주면(內周面)에 삽입함으로써 관 내면에 흐르는 유체에 대하여 내식성을 갖도록 하는 것으로, 그의 연구 동향을 살펴보면 다음과 같다.

국내의 경우, 최백남의 실용등록 20-276989, ‘엘보우관의 보강구조(Reinforced structure of elbow pipe)’에서는 엘보우 파이프의 내경 바깥쪽에 내마모성 합금철로 이루어진 라이너를 여러 조각으로 분할하여 곡관부의 외측에 볼트로 조립하는 것으로 제품의 내구성과 생산성을 증가시키는 방법이다^[5].

이외에도 한국생산기술연구원의 특허공개 2001-111390, ‘내식성 엘보의 제조장치’에서는 발전설비 및 석유화학플랜트 등의 파이프라인의 곡부를 연결하는 엘보우관의 내식성을 확보하기 위하여 내주면에 스테인리스 합금, 니켈합금 또는 동합금 등의 내식성 재료로 클래드(clad)하는 기술을 개시하고 있다^[6].

해외의 경우, 금속성 라이너를 갖는 복합 파이프에 관한 기술과 관련하여 미국, 일본, 유럽 등 주로 고급강의 재료를 이용하는 선진국에서 특허가 등록됨을 볼 수 있었다.

미국의 컴버스천 엔지니어링 특허번호 US 535516 ‘내마모성 비선형 파이프’에서는 교체 가능한 비선형 도관 형태의 내부 라이너를 내마모성이 양호한 세라믹 물질로 형성하고 외주 케이싱은 세로 방향으로 이등분하였으며, 끝 단면은 1/2 등분 플랜지로 서로 체결할 수 있게 하여, 외주면은 클램프로 체결한 후 적절한 모르타로 공간을 충전하는 방식을 이용함으로써, 마모가 심한 내부

라이닝의 교체를 쉽게 하는 방식이다^[7].

일본의 오오가도모코는 특허번호 JP 61-93939, '내마모성 파이프 및 그 제조 방법'에서 세라믹 플레이트를 이용하여 내마모성이 우수한 파이프를 제작하는 방법으로써 나선형으로 배치된 다수의 세라믹 플레이트(ceramic plate)를 파이프의 내주면에 부착하는 것으로 라이닝이 매 주위마다 파이프의 축 방향으로 서로 밀접하도록 나선형으로 배치된 다수의 세라믹 플레이트로 구성되는 것이 특징이다^[8].

일본제철(주)의 특허번호 JP 40528490, '바나듐 소듐 황(vanadium sodium sulphur)과 염소가 존재하는 내식성의 합금 및 복합강 튜브'에서 내부 튜브는 크롬이 함유된 보일러 튜브와 외부 튜브는 합금강으로 구성하고 있다^[9]. 쿠보타(Kubota)사의 특허공보번호 EP 0339071, '고온과 고압에서 우수한 부식 저항성과 기계적 특성을 지닌 복합 파이프'에서는 원유나 천연가스가 생산되는 유정에 사용하는 복합 파이프로 고온과 고압을 동반하는 내식성과 기계적 특성을 지닌 관에 적용 가능한 것으로 언급하고 있다. 이는 C 0.05~0.2%, Si 1% 이하, Mn 2% 이하, Cr 1% 이하, Ni 0.2~2.0%, Mo 1.0% 이하, V 0.05~0.15%, Al 0.1% 이하 과 C 0.45% 이하의 순수 철을 외부로 하고, 내부에는 스테인리스강 및 내식성을 갖는 고합금강 또는 내식강과 같은 라이너를 이용하여 복합관을 만드는 방법에 관하여 기술하고 있다^[10].

스웨덴 산드빅(Sandvik AB)사의 특허번호 US 005324595A, '복합 파이프'에서는 열 피로와 응력부식에 저항성을 가진 개선된 복합 튜브로, 소다 재생 장치(soda recovery units)의 내부에 일반 강관을 이용하고 외부에 크롬-니켈-몰리브덴-철을 기반으로 하는 오스테나이트 구조의 합금 라이너를 이용한 복합 튜브에 관한 내용이다^[11].

(2) 비금속성 라이너를 갖는 복합파이프

비금속성 라이너를 갖는 복합파이프는 모르타르, 수지, 세라믹 및 폴리머 등의 재료를 내식성과 내마모성 라이너로 하여 주철 또는 강재파이프 내주면에

삽입한 구조이다.

이와 관련하여, 국내에서는 서해금속공업(주)의 특허공개 1998-10088호 ‘플랜트용 라이닝 관 구조’에서 내식성 금속라이너를 관의 내주면에 모르타르를 이용하여 설치하는 플랜트용 라이닝관 구조를 기술하고 있다^[12].

한국주철관공업의 특허공고 92-8923, ‘내식성 라이닝 철관 및 그 제조방법’에서는 상하수도와 공장폐수 등의 송배수용으로서 사용하기 위한 내식성 라이닝층을 갖춘 라이닝 철관 및 그 제조에 관한 방법으로, 강관의 내표면에 60~325 메쉬(mesh)로 조성된 에폭시 수지계 분말이나 열경화성 수지 분말과 25~270 메쉬 규사를 5~35:95~65의 비율로 혼합한 혼합사를 조성하여 내식성을 향상시켰다^[13].

한발테프론의 특허공고 95-12871, ‘관계 내면의 수지(resin) 라이닝 방법’에서는 내식성이 우수한 수지를 관 내면에 라이닝한 후 열처리함에 있어 내열성이 강하고 열변형이 적은 입자 또는 분말을 파이프 내주면에 충전하여 라이닝 수지가 파이프 내주면에 단단히 밀착되도록 가압하면서 고온 열처리 하여, 냉각 후 수지가 내면에서 박리되거나 파열되는 것을 방지하여 내구성을 높이는 방법이다^[14].

유인배의 실용공개 90-4248, ‘내마모 라이닝재의 세라믹 타일 접합구조’에서는 세라믹 타일의 외측 방향에 돌출된 돌기와 금속계 또는 고무계의 결속돌기가 서로 결합하는 형태의 세라믹내장형 복합파이프 기술을 개시하고 있다^[15].

해외의 경우, 본 연구와 유사하게 용융주조 현무암을 이용한 라이너재의 복합파이프가 영국의 그린뱅크 주조현무암 엔지니어링(Greenbank Cast Basalt Engineering)사의 특허등록번호 GB 2051281, ‘파이프 곡관 또는 엘보우의 개량’에서는 곡관 파이프의 곡면에 충격 저항성을 갖는 타일을 이용하여 강화, 개량된 곡관을 제작하는 방법이다^[16]. 아킨스 풀포드(Atkins Fulford)사의 특허등록번호 GB 2178500A ‘라이닝 파이프를 위한 타일’에서는 파이프의 45°~360° 굴곡요면(concave surface)과 135°로부터 175°까지 둥근 곡관부에 사용되는 라이닝으로 내마모 타일 접착에 관한 사항이다. 이때 타일로는 주조 현무암, 알루미늄

(Al_2O_3) 또는 실리콘 카바이드(SiC)가 이용된다^[17].

일본의 마루세이 중공업 특허등록번호 평(平)3-149496, '내식성 수지 라이닝 파이프'에서는 금속관류의 내면에 방식을 위한 분체수지의 라이닝 방법이 기술되어 있다^[18].

그 외에도 독일 칼렌본(Kalenborn)사의 특허등록번호 EP 0307609, '고압하에서 화학적 침투를 방지하는 내부 코팅을 갖는 파이프'^[19], 덴소-케미에(Denso-Chemie)의 특허등록번호 DE 19514190, '금속 파이프의 내식제'^[20], 힐엣 알(Hill et al)사의 특허등록번호 US 5992897A, '라이닝 파이프 요소들의 결합법'^[21], 그리고 일본 미쯔비시 중공업의 특허등록번호 JP9313932 '기액접촉장치'^[22] 등의 라이닝에 관한 사항으로 개시되어 있다.

이상에서 살펴볼 수 있듯이, 내마모성·내식성 라이너 또는 내관을 갖는 복합파이프에 관한 기술은 니켈합금, 스테인리스합금 등의 금속성의 라이너와 모르타르, 수지, 세라믹 등의 비금속성 라이너 등이 다양하게 개발되어 있다.

(3) 특허 맵

Table 1.1과 Table 1.2에 한국 및 해외특허에 대한 특허 맵을 나타내었다.

복합파이프에 관한 기술로서 내식성, 내마모성 라이닝재를 파이프 내부에 삽입한 복합파이프에 관한 기술로 한정하여 조사한 결과, 특허출원 건수는 국내자료와 일본자료가 우위를 점하고 있었다. 그 중에서도 금속성라이닝재로서 니켈합금이나 스테인리스합금 등의 재료를 기반으로 한 복합기술이 국내적으로 우위를 점하고 있는 것으로 나타났다.

그리고 비금속성 라이닝재로서는 본 연구와 같이 용융주조 현무암을 파이프 엘보의 라이닝재로 사용한 기술이 해외에서 1980년에 출현한 바 있으나, 그 이후로는 본 기술을 동도바잘트산업에서 2000년 들어 관련기술을 국내특허 획득하였으며^[23-25], 이외에 불소수지 등의 수지계 라이닝재, 세라믹을 이용한 라이닝재, 플라스틱이나 폴리에틸렌 등의 라이닝재를 이용한 복합파이프 기술이 다양하게 개발되어 있었다.

Table 1.1 The Korean patents road map of composite pipe

Year of Application	Technical classification	
	Composite pipe by metal lining	Composite pipe by non-metal lining
A period of 1980		<p>1984: Non-linear pipe of ceramic liner [KR86-2026]</p> <p>1987: Composite pipe by ceramic plate bend lining [KR93-1525]</p>
A period of 1990 and after that year	<p>1998: The structure of lining pipe for plant [KR98-10088]</p> <p>1999: Repeat rolled stainless pipe [KR10-366250]</p> <p>2000: The elbow is welded on the inside surface by resistance corrosion nickel [KR01-111390]</p> <p>2002: The elbow is welded on the inside surface by resistance abrasion alloyed metal [KR20-276989]</p>	<p>1990: Cast iron pipe coat with epoxy resin and Silica sand [KR92-8923]</p> <p>1992: Resin lining method for pipe internal surface [KR95-12871]</p> <p>1997: FRP coated pipe to apply sulphur remove apparatus [KR98-64995]</p> <p>2000: Reinforced technique of basalt tube [KR10-394478]</p> <p>2000 Mortar inserted apparatus for basalt lined pipe [KR10-394479]</p> <p>2001 Cast basalt inserted pipe [KR-10-290176]</p>

Table 1.2 The foreign patents road of composite pipe

Year of Application	Technical classification	
	Composite pipe by metal lining	Composite pipe by non-metal lining
A period of 1980	<p>1988: Double layer stainless pipe [JP1215410]</p> <p>1989: Double layer pipe with inside layer by alloyed metal and outside layer by conventional metal [JP3163289]</p> <p>1989: Double layer pipe with inside layer by stainless steel and outside layer by carbon steel [EP0399071]</p>	<p>1980 : Cast Basalt tube lining elbow [GB2051281]</p> <p>1985 : Cast basalt tile lining elbow [GB2178500]</p> <p>1988 : Double layer pipe with inside layer by powder resin and outside layer by conventional metal [JP119469]</p> <p>1989 : Double layer pipe with inside layer by fluorine epoxy resin tube [JP3149496]</p>
A period of 1990 and after that year	<p>1991: Double layer pipe with inside layer by resistance corrosion material [EP4516967]</p> <p>1991: Double layer pipe with inside layer by chrome metal tube [EP0492517]</p> <p>1994: Double layer pipe with inside layer by carbon steel and outside layer by Cr-Ni-Mo-Fe alloyed metal [US5324595]</p>	<p>1995: Double layer pipe with inside layer by resistable corrosion epoxy resin and outside layer by conventional metal [DE19514190]</p> <p>1996: Polyethylene lining pipe [US5992897]</p> <p>1996: Double layer pipe with inside layer by ceramic ball mixed epoxy resin for Sulphur removal apparatus [JP9313923]</p>

1.2.3 논문의 구성과 내용

본 용융주조 현무암을 이용한 복합파이프 재료는 내마모성·내식성을 위한 기술로써, 관련된 선행기술로는 세라믹코팅, 금속합금코팅 등이 공지되어 있었다. 선행기술 중 세라믹코팅 기술은 광물질을 사용한다는 점에서 본 연구의 기술과 관련성을 가지고 있으나, 본 연구는 현무암을 고온에서 용융 주조하여 제조하는 특징을 가지고 있다.

핵심 기술은 천연현무암을 이용한 친환경적인 재료를 사용하는 것으로 배관에 내식과 내마모성의 고기능을 지니면서 천연 자원을 이용함으로써 정제된 세라믹 분말을 소성 가공하여 생산하는 제품의 가격과 비교하여 그 경제성이 매우 높으므로 본 재료를 부과하는 부분에서 혁신적인 기술로 발전될 것으로 판단된다.

1.2.2의 복합파이프에 관한 연구 동향에서 살펴본 바와 같이 내식성과 내마모성 배관의 연구는 주로 육상의 부식성 화학물 또는 마모성 물질을 이송하는 배관에 관한 연구가 주된 것이다. 현재 해수배관용으로 개발된 파이프의 경우 고탄소강, 용융아연도금 또는 스테인리스강 등의 재료가 사용되고 있다. 또한 재료적 측면에서 강 구조물의 내식성의 개선 방법으로 음극방식법, 외부전원법, 희생양극법 및 피복방식법 등이 될 수 있다. 그러나 해수파이프의 부식문제를 완전하게 해결하기에는 한계성이 있으며, 내식성이 높아지면 가격이 상승하므로 선박의 수명 주기까지 파이프의 보수나 교체 없이 사용할 수 있는 경제성과 내구성을 함께 고려하여, 철강과 용융주조 현무암 복합파이프의 해수 적용성에 관한 타당성을 연구하고자 하였다.

본 연구에서 개발할 최종 목표물은 앞에서 언급한 바와 같이 철강-용융주조 현무암 복합재료 파이프이다. 오늘날 철강재에 관한 연구는 충분히 이루어져 있으므로 이에 관한 자료는 현존하는 많은 문헌을 조사하여, 이의 결과를 활용하고 여기서는 주로 현무암과 철강-용융주조 현무암 복합재료 파이프의 기계적인 특성과 열적인 특성에 대하여 연구하였다.

(1) 천연 현무암의 특성

현무암의 종류를 분류하고 그들의 기계적 특성들을 검토하여 용융주조 현무암으로 사용하기에 적합한 원료를 선택하는 기준으로 하였다.

(2) 용융주조 현무암의 특성

천연 현무암으로부터 분석된 자료를 바탕으로 용융주조 현무암으로 이용하기 적합한 원료를 선별하고 각 원료의 지역별 결정화 특성을 분석하여 우수한 원료의 선택 기준과 결정화 과정에서 나타나는 여러 가지 특징들을 연구하였다.

(3) 용융주조 현무암 재료의 3점 굽힘시험

용융주조 현무암 재료에 대한 3점 굽힘시험편을 다수 제작한 후, 이들을 3점 굽힘시험기에 장착하여 기계적인 성질을 조사한다. 다음으로, 시험편의 내·외부 온도가 평형 상태에 도달할 때까지 충분한 시간동안 가열로 안에서 가열한 후, 3점 굽힘시험기에 장착하여 시험을 실시한다. 이러한 시험을 여러 온도에 걸쳐 실시하여 기계적 성질이 온도에 대하여 어떻게 변화하는지를 알아내어 조사하였다.

(4) 기계·역학적 파손 조건

이와 같은 방법으로 얻어진 용융주조 현무암의 기계적 성질을 이용하여 현무암 주물이 불균일한 온도분포를 갖거나 외력을 받을 때의 응력과 변형율의 분포를 유한요소법으로 해석하고, 이 해석을 바탕으로 하여 현무암 주물이 파손되는 조건을 조사한다. 즉, 어느 특정 온도구배(temperature gradient)에서 파손될지 또는 이 온도구배와 동시에 하중을 받을 때에 어느 하중에서 파손될 것인가를 예측한다. 유한요소법에 의한 해석 시 축대칭물체 열탄소성 해석 프로그램을 이용하였다. 그리고 이렇게 계산된 결과를 실험값과 비교하였다.

(5) 굽힘응력

도출된 결과들을 활용하여 철강-용융주조 현무암 복합재료 파이프의 제작 가능성을 컴퓨터 시뮬레이션으로 검토하고, 사용 중 어떤 문제가 발생할 것인지도 검토 후 실제 시제품 결과물을 제작하여 굽힘 응력을 측정하였다.

본 연구의 목적은 역학적 안전 기준을 연구하여 선박의 설계 및 조선 시 해수배관계통에 적용함으로써 배관의 영구적 사용을 통한 선박의 안전성과 경제성을 향상시키는 것이다.

2. 이론적 배경

2.1 천연 현무암의 특성^[26]

2.1.1 천연 현무암의 분류

현무암은 화산작용에 의해 암장이 지표로 유출되어 급격히 냉각, 응고되어 형성된 화성암이다. 그 용암유동(lava flow)에 가스가 잔류함에 따라 암내에 소형기포(vesicle)가 형성되며, 이때 뜨거운 물과 증기는 암질을 상이하게 변화시켜(hydro-thermal alternation이라고 부름), 변화상태에 따라 강성현무암(compact basalt), 기포성현무암(vesicular amygdaloidal basalt) 그리고 각력암(basaltic breccia)으로 크게 분류된다.

아이슬랜드의 Birgir Jonsson교수의 현무암 분류법에 의하면 **Table 2.1**과 같이 분류할 수 있다.

강성현무암은 보통 각 현무암유동(basalt flow)의 중간층에 위치하고 있으며, 기포성현무암은 상·하층에 놓여있다. 현무암층내의 연약층의 형성과정을 보면, 흘러나온 용암(두께가 보통 수십 미터)의 상부는 급격히 냉각되어 응고되나, 그 아래쪽은 아직 액상으로 이동됨에 따라 그 경계면에 전단이동이 생겨 단절(discontinuity)이 일어난다. 차기 화산폭발로 인하여 흘러나온 용암은 과거에 응고된 현무암층의 상부를 교란시켜 각력암을 형성시킨다. 이렇게 수차례에 걸쳐서 흘러나온 용암은 다수의 용암 유동층으로 적층되어 그 두께가 수백 미터가 되는 것이 보통이다.

현무암의 밀도는 풍화도에 따라 아주 상이하다. 세계 각 처의 현무암 밀도를 조사하여 통합 비교해 보면, 강성현무암은 $2.8\sim 3.0\text{g}/\text{cm}^3$ 로 밀도가 아주 높으며, 이에 속하는 현무암은 미국 콜롬비아(Columbia)강, 드레서(Dresser), 나파(Nappa) 및 체코의 슬라파니(Slapany) 현무암을 들 수 있다. 기포성현무암과 각력암은 **Table 2.2**에서 나타낸 것과 같이 그 밀도가 점차적으로 감소하며, 각력암에 공동(cavity)이 많을 경우에는 밀도가 $2\text{g}/\text{cm}^3$ 로 떨어진다. 예외적으로, 아

이스랜드의 화성암처럼 기공이 아주 많을 때는 그 밀도가 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 이하로 내려가는 경우도 있다.

기포가 많은 현무암은 풍화도가 커짐에 따라 공극률은 20%, 물의 흡수율은 6%나 된다. 공극률과 물의 흡수율은 암의 강도를 크게 좌우한다.

본 연구에서는 강성 현무암을 이용하여 밀도가 $2.8\sim 3.0\text{g}/\text{cm}^3$, 흡수율이 0%에 가까운 치밀한 내부 구조를 갖는 원료를 용융주조 및 열처리함으로써 높은 압축강도와 인장강도를 유지하고, 또한 재결정화에 의하여 천연 현무암보다도 높은 경도를 가지게 하였다.

Table 2.1 Icelandic basalt classified according to rock engineering properties

Traditional field mapping of Icelandic basalts	Proposed legend on map	Proposed "geotechnical" field mapping of basalts in Iceland	Structural/ Mechanical properties		
			Scoria content	Common thickness of lava unit m	Common uniaxial compressive strength ²
Tholeiite basalt	Thl	Tholeiite, thin layered, (associated with central volcanoes)	25~35	3~8	>200 (150~300)
	Tht	Tholeiite, thick (regional)	15~20	10~20	200 (150~300)
Porphyritic basalt	Pom	Porphyritic basalt esp. massive (phenocrysts >10% by volume)	1~5	10~20	200 (100~250)
	Pob	Porphyritic basalt (phenocrysts <10% by volume)	5~15	10~20	200 (100~300)
Olivine tholeiite (Olivine basalt)	Olt	Olivine basalt (Olivine tholeiite)			
	Olc	Compound lavas (from lava shield volcanoes)	0~5	20~80	100 (80~140)

Table 2.2 Density of basalt

Classification of basalt	Density (g/cm ³)
Compact basalt	2.8~3.0
Vesicular amygdaloidal basalt	2.6~2.7
Basaltic breccia	2.1~2.4

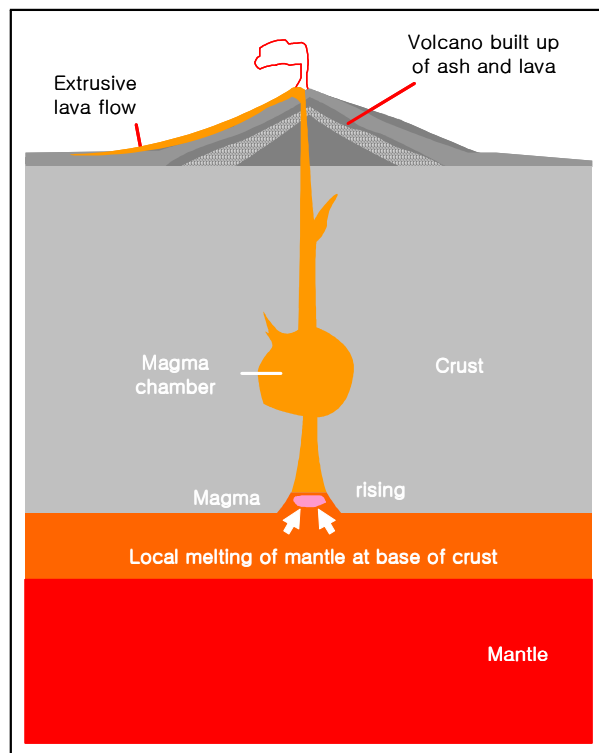


Fig. 2.1 Schematic illustration of Magma and lava flow



Photo 2.1 Lava flow

2.1.2 천연 현무암의 기계적 물성

(1) 압축 및 인장 강도

일축압축강도는 보통 강성현무암에서는 100~250MPa 범위 내에 있다. 그러나 체코의 슬라파니 광산의 현무암과 같이 아주 단단한 것은 300MPa을 초과하는 예도 있으며, 그 반면에 남미의 파라나강 지대의 현무암과 같이 100MPa이하의 무른 것도 있다. 기포성현무암과 각력암의 일축압축강도는 100MPa이하로 낮으며, 그 평균치를 Table 2.3에 나타낸다.

일반적으로 현무암이 물에 포화되었을 때, 그 풍화도에 따라 일축압축강도는 건조되었을 때 보다 25~50%이상이나 감소한다. 그러나, 노르웨이의 트로르드하임(Trondheim) 대학에서 오슬로지역의 페르미안(Permian) 현무암을 포인트 로드(point load)시험기로 조사한 것에 의하면, 물에 포화된 시료가 건조된 것 보다 오히려 강도가 약 25~50% 증가한 기현상을 보여주고 있다. 강성현무암은 단단해서 극 공극률이 보통 2%미만이다. 그러나 기포성 현무암과 각력암은 공극률이 10~20%나 되며, 공극률이 커짐에 따라 일축압축강도는 감소한다.

Table 2.3 One axis compression strength of basalt

Classification of basalt	Compression strength of 1 shaft (MPa)
Compact basalt	100 ~ 250
Vesicula amygdaloidal basalt	50 ~ 100
Baaltic breccia	25 ~ 50

(2) 탄성 및 변형계수

주요 현무암의 탄성계수와 1축 압축강도의 비교를 조사해 보면 거의 모두 평균계수율(average modulus ratio)의 범위 내에 놓여있으며, Deere교수의 분류법에 따라 분류하면 AM, BM 및 DM에 속한다.

현무암의 변형계수는 보통 현지에서의 팽창계(dilatometer)시험과 조사 분석

한 팽창계시험과의 평판재하시험으로 구한다. 그리고 현무암의 푸아송의 비 (Poisson's ratio)는 보통 0.15~0.25범위 내에 놓여있다.

현무암의 탄성계수와 변형계수는 풍화도와 공극률에 따라 상당히 변화하며, **Table 2.4**에 종합평균치 결과를 나타낸다.

Table 2.4 Elasticity and modification coefficient of basalt

Classification of basalt	Coefficient of elasticity (GPa)	Coefficient of modification(GPa)
Compact basalt	40~70	20~25
Vesicular amygdaloidal basalt	20~40	10~15
Basaltic breccia	10~20	0.5~10

(3) 전단강도

현무암의 전단강도 그 풍화도에 따라 아주 상이하며, 세계 각 처 현무암의 전단강도를 종합해서 평균을 내보면 **Table 2.5**와 같다.

Table 2.5 Shearing strength of basalt

Classsification of basalt	Angle of friction	Power of adhesion(MPa)
Compact basalt	45°~60°	0.5~1.5
Vesicular amygdalodial basalt	40°~50°	0.5~1.5
Basalt breccia	35°~40°	0.5~1.5
Discontinuities	30°~50°	0~1.0
Clay infilling	20°~25°	0~0.1
Clay infilling (residual)	15°~20°	0~0.01

(4) 투수계수

현무암층은 전술한 바와 같이 그 형성과정에 따라 거의 수평으로 놓여있으며, 그 사이사이에 각력암이 끼어있어 수평방향의 투수계수가 수직방향보다 훨씬 더 크다. 현무암의 종류 중에 단절(discontinuity)은 특히 투수계수가 높다.

Table 2.6 Absorption coefficient of basalt

Classification of basalt	Coefficient of absorption(cm/sec)
Compact basalt	$< 10^{-5}$
Vesicular amygdaloidal basalt	$10^{-33} \sim 10^{-5}$
Basaltic breccia	$10^{-33} \sim 10^{-4}$
Discontinuity	$10^{-23} \sim 10^{-4}$

2.2 용융주조 현무암의 특성^[2]

2.2.1 현무암 원료의 지역별 특성

(1) 용융암석의 화학조성과 용융방법

산업용으로 사용될 수 있는 용융주조 현무암석 원료는 **Table 2.7**에서 나타낸 것과 같이 지역에 따라 조금씩 다른 화학적 조성을 나타내고 있다. 또 암석산업에 있어 현무암만이 원료로 사용되는 것이 아니라, 휘록암, 슬래그(slag), 그리고 때로는 합성물이 사용되기도 한다.

원료의 화학적 조성 차이는 고온 용융 주조공정에 있어 기술적 방법의 선택에 영향을 미친다.

현무암 파쇄원료의 크기는 8~15cm로 철강공장에서 사용되는 개방형 하스로(open hearth furnace)와 유사한 로에서 용융되며, 그 크기는 다소 작고, 충전축(loading or charging shaft)에 의해 용융물 원료로 공급된다.

용융물은 가스를 이용하여 가열하며 용융온도는 약 1,250~1,350℃이다. 이때 가장 중요한 것은 모든 가시 입자의 완전한 용융이다.

용융된 원료는 약 1,200℃로 균질화 드럼(homogenizing drum)에 담겨 부어지게 된다. 여기서 용융물은 혼합과 균질화를 거치며, 결정되는 자철석의 핵은 제품의 결정화를 높게 가속시킨다. 그 이후의 과정은 금속생산 공정과 유사하다.

Table 2.7 Chemical composition of the industrial fused rocks (wt.%)

State	France	Germany	U.S.S.R			Czech		Poland	Germany
Enter-prise	Vitry	Kalen-born	Moskva	Doneck	Krivoj Rog	Stara Voda	Nova Bana	Stara-chowice	Eis-leben
Rock	Basalt	Basalt	Basalt	Gangue	Diabase	Basalt	Basalt	Basalt	Slag
Chemical analysis									
SiO ₂	42.80	44.70	49.85	49	47	45.48	46.13	44.97	47.25
TiO ₂	3.63	1.00	2.49	-		1.10	3.60	1.43	0.80
Al ₂ O ₃	11.02	11.92	12.45	20	14	11.67	11.34	14.34	16.88
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-		-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	6.26	16.56-	3.04	9	3	5.55	4.36	4.31	0.11
FeO	7.04		11.02		12	7.10	7.30	7.14	3.72
MnO	-	8.47	0.22	-	-	0.26	0.20	0.30	0.46
MgO	10.04	10.45	6.00	10	9	10.14	10.43	10.38	7.53
CaO	11.12		9.80	13	12	10.14	10.00	11.11	18.35
Na ₂ O	2.57	5.06	2.69	2.5	4	2.02	3.55	2.97	1.6
K ₂ O	1.79		0.66			1.17	2.10	1.70	3.14
H ₂ O -110 °C	0.40	1.34	0.63	-		1.00	-	-	-
H ₂ O +110 °C	2.73		1.53	-		2.40	-	1.03	-
P ₂ O ₅	0.68	-	-	-		1.30	0.92	0.33	0.50
CO ₂	0.20	-	-	-		-		-	-
	100.28	100.00	100.38	103.5	101	99.09	99.93	100.01	100.44

(2) 고온 용융 특성

암석 용융의 광범위한 결정연구를 통하여 양질의 현무암석 원료의 선택을 위한 표준을 마련하는 것이 필요하다. 따라서, 주형에 채워진 현무암 용융물의 온도 간격에 따라 결정화된 현무암 구조물들의 주요 결정면들을 **Photo 2.3**, **Photo 2.4**와 **Photo 2.5**의 사진들과 각 지방에서 채취한 현무암 용융특성 및 결정화 과정에 의해 양질의 원료를 구분하고자 한다.

주형으로부터 탈형된 주물 결정시험편은 24시간 동안 1,300~600℃의 온도 범위 내에서 암석 유리화의 점진적인 결정화를 보여주고 있다. 사방정계 휘석을 제외한 상기의 각 결정면들은 최고의 온도에서 암석용융으로부터 분리된 완전한 이질동상(automorphic) 결정학상의 형태를 아래 그림들과 같이 생성한다.

Photo 2.3은 체코 스타라 파카(Stara Paka)지역의 고현무암(paleo-basalt)으로부터 1,220℃의 온도에서 분리한 이질동상의 자철광을 보여주며, 밝게 깎아진 면은 장석에 속한다.

Photo 2.4는 체코 마리안스케 라즈네 스파(Marianske Lazne Spa)지역에 있는 포드호라 언덕의 감람석 하석(olivine nephelinite)으로부터 1,250℃의 온도에서 분리한 이질동상의 감람석을 보여주며 유리 주변에 위치한 검은 결정들은 자철석에 속한다.

Photo 2.5는 폴란드 미코라예비체(Mikolajewice) 지역에 있는 감람석 현무암(olivine basalt)으로부터 1,190℃의 온도에서 분리한 이질동상의 단상 휘석 결정들을 보여주며 유리 주변에 다수의 자철석 입자가 있다.

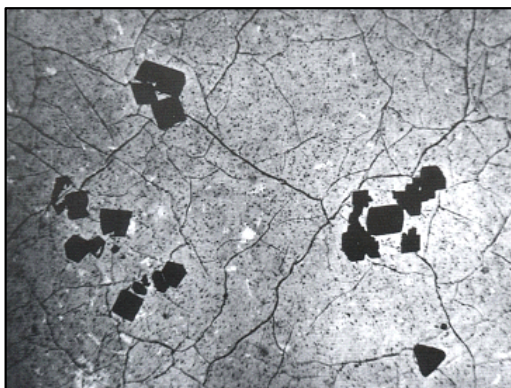


Photo 2.3 Automorphic magnetite ($\times 116.7$)

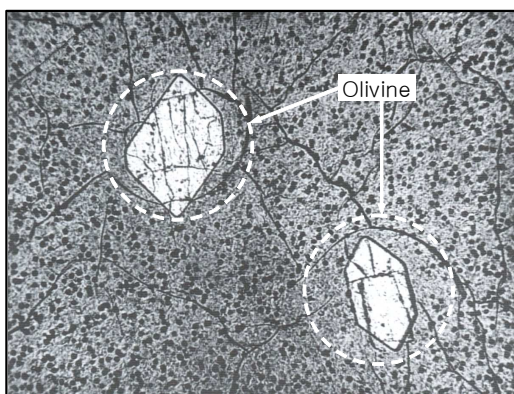


Photo 2.4 Automorphic olivine crystal ($\times 116.7$)



Photo 2.5 Monoclinic pyroxene automorphic crystals ($\times 295$)

(3) 용융 후 온도하강시의 결정화 특성

용융 현무암의 주요 특성 중 하나는 용융 후 주형에 주조하는 동안 온도가 급격히 하강하는 과정과 풀림로(annealing kiln)를 통한 온도의 점진적인 하강 과정에서 생성되는 내부구조인데, **Photo 2.6, 2.7** 및 **2.8**은 암석의 골격형상을, **Photo 2.9, 2.10** 및 **2.11**은 덴드라이트(dendrite)상을 나타낸다.

Photo 2.6은 스타라파카 지역의 고현무암에 있는 자철석이 1,250℃의 온도에서 부분적인 골격진화를 보여주며, 유리 내의 밝게 깎인면은 장석(feldspar)에 속한다.

Photo 2.7는 마리안스케 라즈네 지역의 포드호라(Podhora) 언덕의 감람석 현무암으로 1,185℃의 온도에서 부분적인 스켈리틀(skeletal)상 감람석이 분리되었다.

Photo 2.8는 리보코바니(Libochovany) 지역의 감람석 현무암 용융물로 1,125℃의 온도에서 단상회석의 부분적인 스켈리틀상 결정이 분리되었다.

Photo 2.9는 스타라 파카 지역의 고현무암 용융물이 1,065℃의 온도에서 자철석의 덴드라이트상으로 성장한 사진이다.

Photo 2.10은 마리안스케 라즈네 지역의 포드호라의 감람석 하석으로 900℃의 온도에서 덴드라이트상의 감람석이 분리되었다.

Photo 2.11은 리보코바니 지역의 감람석 현무암에 있는 단상회석이 1,105℃의 온도에서 덴드라이트상의 성장을 나타낸다.

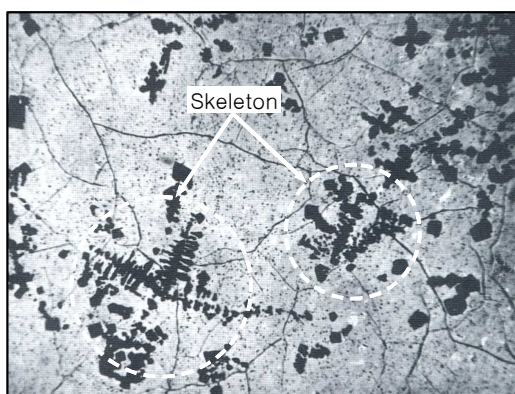


Photo 2.6 Partially skeletal evolution of magnetite ($\times 245$)



Photo 2.7 Partially skeletal olivine ($\times 116.7$)

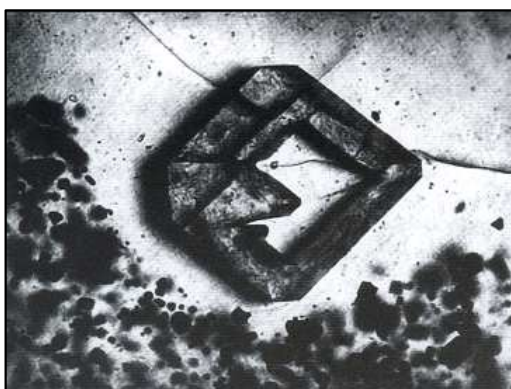


Photo 2.8 Partially skeletal crystal of monoclinic pyroxene ($\times 470$)

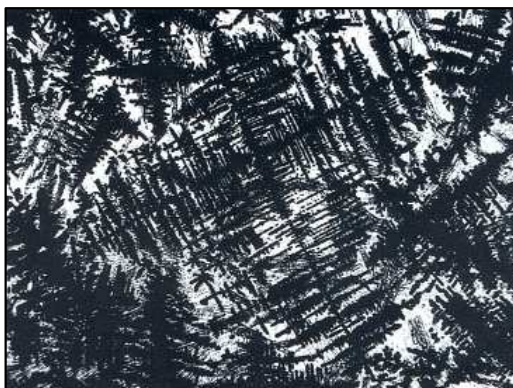


Photo 2.9 Dendritic grows of magnetite ($\times 116.7$)

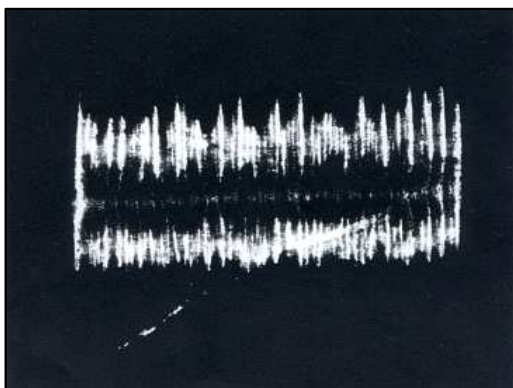


Photo 2.10 Dendritic olivine ($\times 245$)

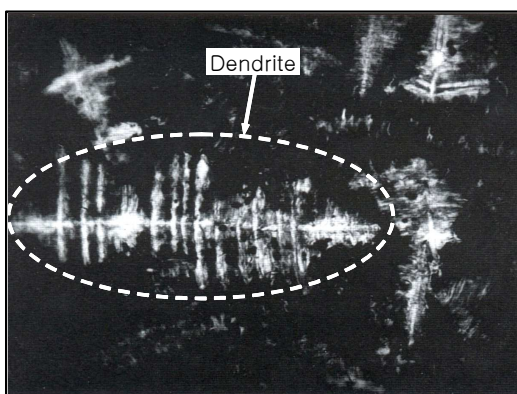


Photo 2.11 Dendritic grows of monoclinic pyroxene ($\times 116.7$)

(4) 양질의 용융현무암 구분 방법

암석 용융결정체의 연구로 결정화된 주조제품에서 가장 양질의 암석이 나타
는데, 이들은 재결정화 중 새로운 결정상이 생성된다. 또한 이러한 결정면은 각
섬석과 장석에도 포함되며, 추가로 자철석, 감람석 및 휘석에도 존재한다. 각섬
석이 결정화되기 위해서는, 용융물 내에 수증기가 포함된 일정량의 가스가 필
요하다. 산업용품 크기의 제품을 생산하기 위한 용융시간은 실험보다 더 길며,
용융 중 수분의 손실은 각섬석의 결정화를 방해한다.

그러므로 주조 시, 각섬석의 결정화를 피하면서 생산되도록 하는 것이 중요
하다. 주형에 채워진 뒤에 용융 현무암 온도의 급격한 하강은 사장석의 결정화
를 방해한다.

후자의 두 광물의 잠재적인 존재는 잔류 유리의 화학작용으로 보여진다. 각
섬석과 사장석 둘 다 주조품질을 감소시키므로 원치 않게 결정화된 현무암 주
조재로 생각된다. 그와 반대로 재결정화된 주조품에 있어서 기본적으로 어느
정도의 유리는 중요하다.

현무암 암석의 광역 스펙트럼은 용융에 의한 주요성분의 분리로 사장석에 앞
서 휘석-암석학적 강화에 대한 적합성의 기본적인 기준이다.

이 품질은 그들 화학 조성의 변화만큼 암석학 T.F.W. 바스 방정식(T.F.W.
Barths equation)으로 현무암적 암석을 규정한다. 조사된 암석은 본 기준을 바
탕으로 3가지 그룹으로 분류된다.

가. 평균 117의 값: 휘석에 앞서 사장석의 분리 (부적절함)

나. 평균 117~123의 값: 두 광물이 동시에 분리가 시작 (가장 부적절함)

다. 평균 123의 값: 사장석에 앞서 휘석의 분리 (선택 후 적절함)

바스 평균치 124.49를 가지는 리보코바니 현무암과 126.26의 슬라파니 현무암
은 3번째 그룹의 최저한계보다 떨어진다. 휘석의 분리를 진행시키는 것은 용융
시, 휘석과 사장석의 성분 사이에 평균 공용단계에서 유도되며, 언제 두 광물이
적절한 조건에서 분리되는 것인가가 의문이다. 연구실 조건하에서 동시에 휘
석·사장석으로 분리될 때의 용융혼합물은 1,155℃의 온도에서 형성된다. 비록

공용상태가 주조물의 결정화 시 어느 순간에 일어난다 하더라도, 주형에 부은 뒤의 슬라파니 현무암 용융물의 온도가 급격히 하강함으로써 사장석이 결정화 되는 것을 방해한다.

2.2.2 슬라파니(Slapany) 천연 현무암의 특징

슬라파니 현무암의 양호한 화학 조성은 높은 결정화 능력과 그와 동시에 그것의 용융으로부터 빠른 결정을 하도록 한 결과이다. 이러한 특성들은 잔존하는 일정량을 유리면의 미립자 섬유질로 만들어, 냉각 중에 주조품의 파열을 막아준다.

슬라파니 광산의 현무암은 반암(班巖)적인 섬유질을 가지고 있다. 0.2~0.3mm 크기의 페오크리스트(pheocrysts)로 수많은 감람석 결정들이 미립자 석기(石基, groundmass)속에 나타나며, 55vol.%의 사회석, 20vol.%의 Na-Ca계 사장석, 10vol.%의 자철석 그리고 15vol.%의 감람석으로 구성된다.

Photo 2.12는 슬라파니 광산의 알칼리 현무암의 현미경 사진이다. 광범위하게 다양한 색상과 밝은 회색결정이 감람석 페오크리스트에 속한다. 검은색은 최적 위치에 있는 감람석 결정들이다. 작은 기둥과 같은 사회석 결정들은 용암 천에서 움직임으로 인하여 다소 평행 위치에 있다. 어두운 회색이 약간 있는 사장석 결정이 안정상태를 만든다.

불규칙적으로 드물게 감람석 입자들이 1cm 크기로 나타나며, 이는 현무암 용융물이 시작되는 지구 내 맨틀 상부로부터 100~300km의 깊이의 현무암석의 마그마에 의해 변환된 것이다. 암석에서 감람석의 총 함량은 15vol.%이다.

큰 덩어리는 슬라파니 현무암 광산의 용암 흐름의 열용량과 마찬가지로, 서서히 냉각되어 결과적으로 상대적인 굵은 결정 크기를 낳았다. 반대로, 주형에 부어진 작은 양의 현무암 용융물의 열용량은 매우 낮고 온도는 빠르게 떨어져 오직 매우 작은 결정들, 스켈리틀상 또는 텐드라이트상까지도 허용한다. 재결정된 주조품의 외부와 내부의 구조를 만약 슬라파니 광산의 천연 현무암의 구조

와 비교해 보면 작은 미립자로 되어있다. 이것이 기계적인 특성들과 화학 저항성을 좋게하는 가장 중요한 원인의 하나로 여기의 두 부분이 천연 현무암의 값보다 우수함을 본 단원 2.2.4 (3)용융주조 현무암과 천연 현무암의 물성 비교에서 나타내고 있다.

조업 조건에서 슬라파니 현무암 용융물의 결정화는 사장석의 분리를 배제하는 것으로, 이는 현무암석 원료에 20vol.%의 양이 존재하며 또한 슬라파니 현무암이 연구실에서 재결정화 할 때에도 존재한다. 주조품에 있어서 사장석의 부재 역시 재결정화된 주조품의 특성(마모와 화학 저항성)에 긍정적인 영향을 미친다.

슬라파니 광산의 알칼리 현무암은 제3기(Tertiary) 분출 화산암이다. 그것은 화학적 변성이 낮은 물질로 큰 규모의 거대한 용암 흐름으로 형성된다. 그것의 방사성 연대 나이로 2,150만년은 암석재질에 부정적인 영향을 주지 않았고, 이는 기후로 인한 이차 변화가 없었음을 보여준다. 암석의 일정한 품질은 성공적인 주조품 생산에 중요하다.

Photo 2.13(a)는 슬라파니 현무암의 이차 구정형 결정화의 표면층에 둥근 잔존 감람석 입자들이 쌓여져 있다. 사방정계 휘석 구정들이 자철석 결정화 중앙에 나타난다. 아주 미세한 자철석에 있는 잔존하는 유리는 검은 메소스티스(mesostis)를 만든다.

Photo 2.13~14에서 감람석은 높은 용융 온도를 보이며, 용융 중에 그 결정의 전체를 분해하는 것은 에너지 소비가 높아지기 때문에 작은 잔존 입자들은 남겨 주며, 주조 용융물 내에 결정화된 주조물의 구성요소의 점도 문제가 없게 한다. 잔존 감람석 입자는 원심회전을 하는 주형에서 동적으로 주조된 파이프 제품으로 주조물의 표면에 모이며, 초기 결정화된 주조물의 유리화된 외부면 고형화 층들의 벽면 경계에 모인다.

Photo 2.13(b)은 슬라파니 현무암 파이프의 표면층의 이차 구정형의 결정화는 둥근 잔존 감람석 입자들을 포함한다. 사방정계 휘석 구정들이 자철석 결정 중심에 나타난다. 검은 메소스타사스는 아주 미세한 자철석 내의 잔여 유리에

속한다.

Photo 2.14(a) 오른쪽에는 잔존하는 감람석 입자들이 초기 결정화의 내면 접촉 부분과 슬라파니 현무암 파이프의 벽면 이차 결정화되는 외부 표면층에 쌓인다. 회전 용융물에 있는 감람석 입자들의 원심 운동이 슬라파니 현무암 주조품의 유리화로 고정화된 외부 표면층에서 멈추었다.

Photo 2.14(b) 오른쪽에는 초기 결정화된 슬라파니 현무암 파이프 벽의 내부면과 이차 구정형의 결정화 층 사이 경계면의 상세 보기로 오른쪽 상부 그림의 흩어진 하얀 점들은 뜨거운 현무암 용융에서 불분해 상태인 잔존 감람석 입자들이다. 날카로운 가장자리로 큰 잔존 감람석 입자들은 주조품의 내부에서 용융물로 회전하기 때문에 제거된다.

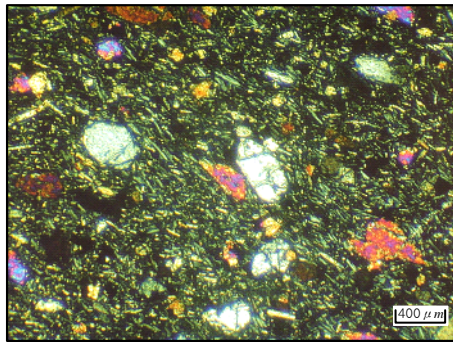
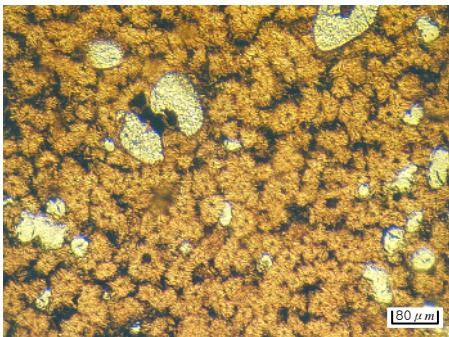
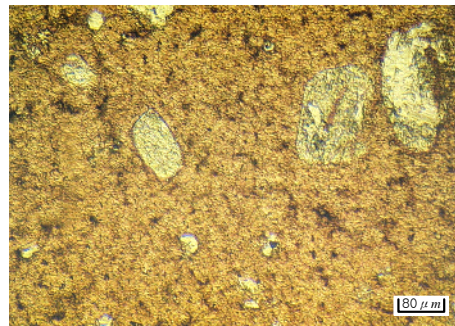


Photo 2.12 Microphotograph of alkali olivine basalt

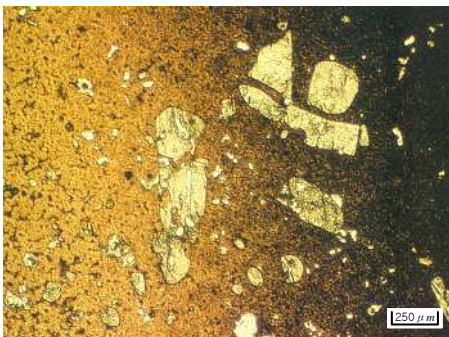


(a) Basalt tile

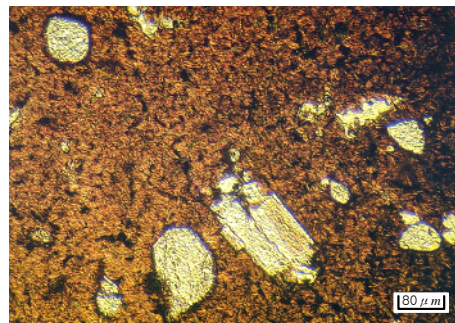


(b) Basalt pipe

Photo 2.13 Secondary spherulitic crystallization of the surface layer



(a) Relic olivine grains cumulated at the contact of the inner portion



(b) Detailed view of the boundary zone

Photo 2.14 The primary crystallization (to the right) and the secondary spherulitic crystallization layer

2.2.3 슬라파니 용융주조 현무암의 결정화 특성

스타라 보다의 주조공장에서 현무암 원료의 용융은 특수하게 회복력이 있는 개방형 하스로(open hearth furnace)를 천연 가스로 가동한다. 이 과정에 있어 용융 온도는 슬라파니 현무암의 주요 광물인 휘석(보통 휘석)과 장석(사장석)의 용융 온도 $1,280^{\circ}\text{C}$ 를 초과한다. 용융 과정에 있어서, 현무암 원료의 주요 성분인 감람석과 자철석은 장석과 휘석에 혼합되어 $1,280^{\circ}\text{C}$ 보다 낮은 온도에서 용융된다. 감람석과 자철석은 서서히 용융되고, 완전히 용융되지 않은 큰 결정이 최종 용융물로 주형에서 주조되어 남게 된다. 현무암 용융 작업은 대체로 야금학의 과정이다. 형상은 주형 안에서 주조되어 제작된다. 파이프는 금형을 900rpm의 속도로 회전하여 원심 주조에 의해 생산된다. 타일과 그 외의 제품들은 금형(metal mould)에 주물을 붓는 것에 의해 제작된다. 사형(sand mould)은 특별한 형상의 주조품을 생산하는데 사용된다.

균열을 방지하기 위하여, 주조품들은 그들이 고형화된 후 수분 내에 주형으로부터 이탈되어야 한다. 주조품의 냉각은 전기 터널식 소둔로에서 행해진다. 이 과정은 유리 기술과 유사하지만, 약간 더 복잡하다. 주조품의 단단해진 표면층의 유리 결정화는 프로세스의 맨 처음 상(相) 동안에 냉각으로 적절히 진행된다.

이러한 표면층의 결정화 특성을 살펴보면, 주조품을 주형에서 이탈 시킨 후 열처리로에 삽입 후, 공기와 접촉하지 않은 주조품의 내부에서 발생하는 열이 밖으로 전달되며 온도가 상승될 때의 결정화와 내부 온도가 모두 전달되고 열처리로에서 서서히 온도가 하강할 때 결정화가 생기는 과정을 아래에서 살펴볼도록 한다.

(1) 온도 상승시의 초기 결정화

금형에 부은 후, 급히 냉각되는 현무암 용융물은 주조 벽의 안쪽 부분과 그들의 바깥쪽은 공기와 직접 접촉하게 되어 십여 초 내로 온도 간격이 $1,150\sim 1,000^{\circ}\text{C}$ 로 된다. 미립 무 방향성 또는 구형의 섬유질이 형성된다.

Photo 2.15(a)는 슬라파니 현무암 타일의 초기 결정화 내부 구조이다. 자철석 결정화 중심(하부 중앙)에 텐드라이트상의 단사정계 휘석 구형으로 구성된다. 어두운 메소스타시스는 잔존 유리에 속한다.

Photo 2.15(b)은 슬라파니 현무암 타일의 초기 결정화 표면층이다. 단사정계 휘석으로 구성된 구정(球晶)이 자철석 결정화 중심에 나타난다. 구정 사이의 틈들은 잔여 유리상으로 채워지며, 불규칙한 흰색은 잔재 감람석에 속한다.

Photo 2.16(a) 초기의 무방향 섬유질이 슬라파니 현무암 타일의 내부면을 결정화 하였다. 초과중량의 단사 정계 휘석이 노란 이질동상 기둥 형상과 스켈리틀상 결정들을 만든다. 검고 갈색의 점들은 텐드라이트상의 감람석의 무리들이다. 잔여 유리는 미정질 자철석과 함께 메소스타시스를 만든다. 잔여 감람석은 입자들은 흰색을 띤다.

Photo 2.16(b)는 초기의 무방향 섬유질이 슬라파니 현무암 파이프의 내부면을 결정화한 것으로 노란 기둥 형상과 스켈리틀상 단사정계 휘석으로 구성되었다. 검고 갈색의 점들은 텐드라이트상의 감람석의 무리에 속한다. 흰색 잔존 감람석은 드물다. 미정질의 자철석에 있는 잔여 유리는 어두운 메소스타시스를 만든다.

Photo 2.17은 슬라파니 현무암 타일의 표면층에서 이차 결정화의 구정형 섬유질로 구정들은 스켈리틀상의 사방정계 휘석과 자철석 결정화 중심으로 구성된다. 미결정(微結晶) 자철석에 있는 잔여 유리는 어두운 메소스타시스를 만든다. 중앙의 하얀 점은 잔존 감람석에 속한다.

다른 여러 종류의 현무암이 슬라파니 현무암과 같이 용융에 있어 좋은 결정 능력을 보여 주지는 않았다. SiO_2 함량이 47wt.%인 암석을 용융한 연구실 조사에서 높은 점도와 낮은 결정 능력을 나타내었고, 그것들은 주형이 붓고 난 후 유리에서 부분적으로 고형화가 되었다. 반대로, SiO_2 함량이 44wt.%인 암석 용융은 잔여 유리가 없이 완전히 결정화 되고 구조물들은 냉각 중에 깨어졌다. SiO_2 함량이 45.2wt.%인 슬라파니 광산의 현무암은 상기에서 언급한 SiO_2 함량의 중간 값에 해당하는 것으로 나타났다. 그것은 용융의 초기 결정화에 대하

여 가장 적절하다는 것을 보여준다.

(2) 온도 하강시의 이차결정화

금형에 직접 닿는 주조물(타일과 파이프)의 표면층은 1,000℃ 이하로 급격히 냉각되기 때문에 3~5mm 두께로 유리화가 된다. 이러한 구역은 주조물을 탈형시킨 후, 열처리 풀림로를 통하여 다시 결정화가 된다. 초기온도 850℃는 이온의 움직임을 허용하여, 750~680℃ 구간에서 주조물이 서서히 하강되는 온도범위로 자철석 결정을 분리함으로 사방정계 휘석 구정의 결정화가 이루어지게 된다.

Photo 2.17는 특징 있는 구정형 섬유질의 결과로 주조물의 기대되는 기술적 특성 조건이 된다. 사방정계 휘석의 분리를 위한 최적 조건은 가열된 주조물이 800~840℃의 온도에서 발생하고, 본 결정면이 최고로 결정화 비율을 나타낼 때이다.

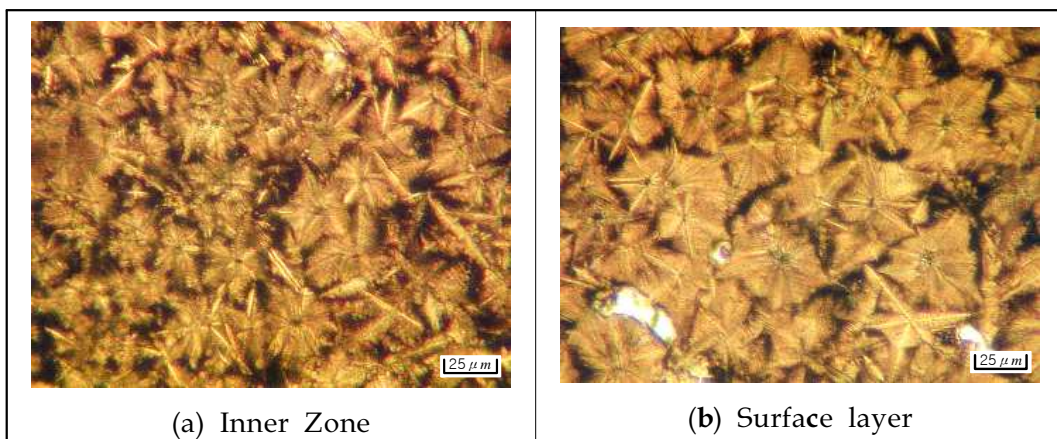


Photo 2.15 Primary crystallization of Slapany basalt tile

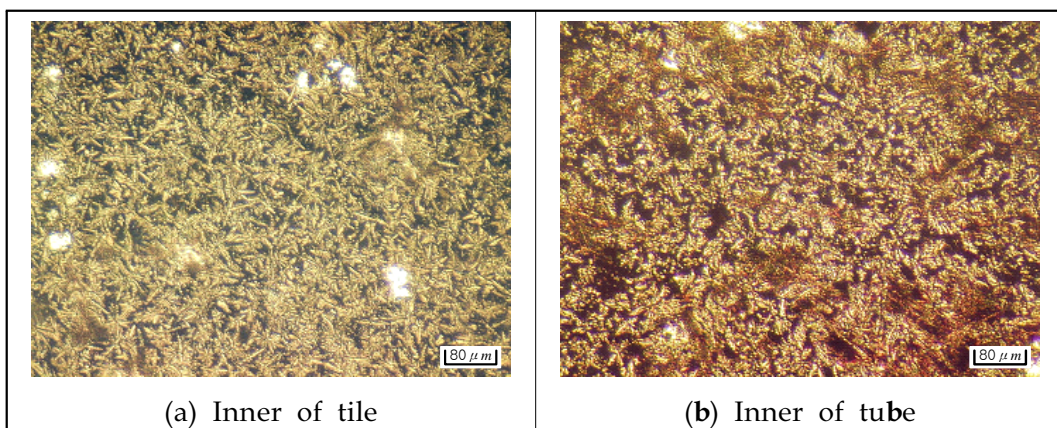


Photo 2.16 Directionless texture of primary crystallization of Slapany basalt

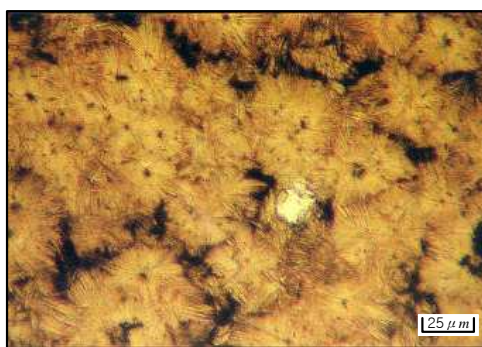


Photo 2.17 Spherulitic texture of secondary crystallization of the surface of a Slapany basalt tile

(3) 구조물의 표면층에 나타나는 두 종류의 결정화 특성

공기와 직접 접촉하는 현무암 용융물은 중력에 의한 타일의 정적주조 파이프의 동적주조 중 금형에 접촉되는 것보다 서서히 냉각된다.

Photo 2.18(a), (b)와 같이 초기 결정화는 열용량을 충분히 가진 구조물의 내주면으로부터 용융물의 개방 외주면에 이르게 된다.

점진적인 변화가 지배하는 단사정계 휘석과 함께 구조물 벽의 내부면 구정의 직물에 이르기까지 상대적으로 조악한 입자인 무방향성으로부터 개방된 표면층의 동일한 광물학적 구성으로 점차 미립자로 구정형 섬유질에 이르고, 잔존하는 유리면의 함량이 점차로 올라간다. 초기결정의 표면 층 두께는 보통 3~5mm로 구조물의 열용량에 의존한다.

Photo 2.16(a), (b)는 이차결정화 표면층은 상기 요소에 기인하는 금형구조물에만 나타난다. 이러한 층들은 구조물의 표면에 더 가까운 곳에서 점진적으로 조밀한 구정의 섬유질인 사방형의 휘석이 지배에 의해 특성화된다.

이차결정화의 표면층과 초기결정화의 지역이 사이의 경계는 상대적으로 날카롭게 남아있고, 초기결정의 내면에서 초기에 유리로 굳어진 표면층의 접촉으로 뚜렷하게 경계를 이루게 된다. 이차결정화의 표면 층 두께는 보통 3~7mm로 덩어리와 구조물의 열용량 그리고 주형의 예열 정도에 의존한다.

구조물의 초기결정화된 구역의 내부 섬유질은 그들의 표면층보다 다소 더 굵은 입자이다. 위에서 언급한 구조물 부분 양쪽에서 어느 정도 작은 양으로 잔존하는 유리면이 결정면에 추가로 나타난다.

Photo 2.15(a)의 왼쪽은 슬라파니 현무암의 초기 구정형 결정화 표면층이 단사정계 휘석(왼편)에 의해 만들어졌음을 나타낸다. 초기결정화가 내부로 점진적인 전달되고, 하얀 점은 잔존 감람석에 속하며, 구조물 표면의 하얀 원은 동결 기포이다.

Photo 2.15(b)은 슬라파니 현무암 파이프의 내주면이 초기결정화를 시작하여 사진의 오른쪽 방향인 표면층을 나타내는 것으로 단사정계 휘석의 무방향 섬유질은 더 작은 미립자로 되고, 구정형의 섬유질로 변한다. 하얀 점들은 잔존 감

람석에 속한다.

Photo 2.16(a)는 슬라파니 현무암 타일의 이차 결정화의 표면층으로 초기결정화의 내주면은 사진의 왼쪽처럼 날카롭게 변환되었고, 구정형의 섬유질은 사진의 오른쪽처럼 구조물의 표면 방향으로 더 조밀하게 정렬해 있다. 잔존 감람석은 하얀 점들을 만들고, 하얀 원은 냉각된 기포에 속한다.

Photo 2.16(b)의 오른쪽은 슬라파니 현무암 파이프의 이차 결정화의 표면층으로 초기 결정화의 내부면의 경계는 날카롭다. 상부 중앙의 하얀 점들은 잔존하는 감람석 입자가 경계면에 쌓인 것이다. 사진의 왼쪽 경계에 큰 냉각된 기포가 있다.

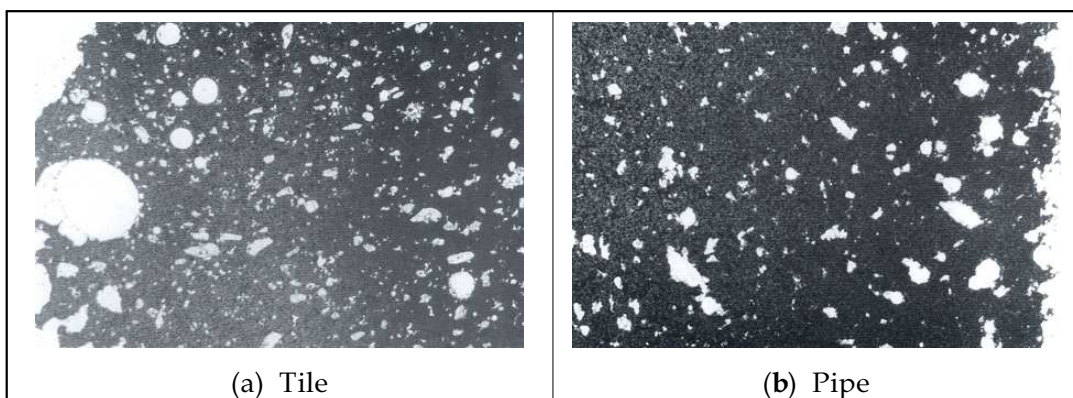


Photo 2.18 Primary crystallization character on the surface layer ($\times 17.25$)

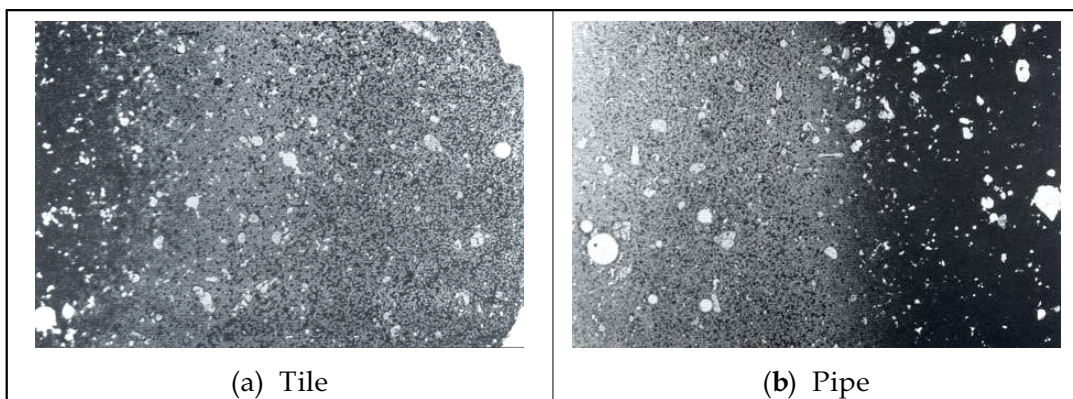


Photo 2.19 Secondary crystallization on the surface layer ($\times 17.25$)

2.2.4 결정화 진행과정

(1) 온도에 따른 결정화 진행과정

개별적인 결정상(crystal phase)의 결정화 과정은 1,300~750℃의 온도 증감 변화 범위에서 슬라파니 현무암 용융으로부터 분리한 것으로 재결정 물질의 미세 연구를 이용하여 관측된 것이다. **Fig 2.1**은 실험 진행을 위해 원료를 사용된 리보코바니 알칼리 감람석 현무암의 초기 결정화 온도 결정의 방법을 설명하는 것이다. **Table 2.8**에서는 그들 낙하에 대한 더 낮은 온도와 또한 같은 시간에 그들 결정화 간격들은 현무암 유리의 다른 온도 분석을 이용하여 연구되었다.

Table 2.8 Temperature intervals of crystal phases of laboratory crystallization of alkali olivine basalt of Slapany

Magnetite	1,259~750℃
Olivine	1,180~1,145℃
Rhombic pyroxene	1,175~750℃
Plagioclase feldspar	1,155~900℃
Monoclinic pyroxene	1,150~1,000℃
Monoclinic amphibole	1,145~1,000℃

(2) 결정화 온도 구간과 현무암 주조물의 횡단면 구조

Fig 2.1은 주형에 채워진 후 급격히 냉각하는 동안 주조물 벽면의 내부의 초기 결정화 온도 간격은 그것의 결정화 정도와 주조물의 섬유질에 따라 간섭을 받을 수 있으며, 이는 열 변화에 있어 실험적인 결정 분석을 기초로 한다

리보코바니 광산으로부터 알칼리 감람석 현무암의 초기 결정 온도 간격은 상기에서 언급한 방법에 따라 **1,150~1,000℃**의 값과 일치하는 것에 의해 결정된다. 이 열 간격은 자철석과 감람석 분리뿐만 아니라 단사정계 휘석 분리에도 이용한다. 휘석은 주조품으로 논의된 구역들에 있어 가장 빈번한 결정면이고, 그것들의 이용할 수 있는 기술적 특성들을 결정한다.

Fig. 2.2는 현무암 파이프의 횡단면을 보여준다. 구간 **(1)**에서는 내부 벽의 이차 결정화 구역은 바늘 모양의 사방정계 휘석으로 자철석 중앙에 구멍인 형태로 구성을 이룬다. 구멍의 지름은 벽의 표면방향으로 작아진다. 구간 **(2)**에서는 단사정계 휘석의 기둥들이 무작위로 위치해 있다. 자철석의 입자들이 역시 초기 결정화의 내면의 무방향 섬유질로부터 이차 결정의 외부 층의 하나인 구멍에 까지 상대적으로 날카롭게 나타난다. 회전의 효과 때문에 잔존하는 감람석 입자는 주조물의 내부 구역의 접촉부와 남아 있는 유리의 외부 구역에 집중한다. 뜨거운 용융물 내의 거품들은 파이프의 내부 벽에 배출된다. 구간 **(3)**에서 외주면의 안쪽 부분은 구멍형의 섬유질이 존재한다. 그것은 사방정계 휘석과 자철석 그리고 잔존 유리로 구성된다. 내부 구역의 바깥 부분은 유리화이고, 파이프의 표면에 평행하게 있는 사방정계 휘석 구멍에 좁고 길쭉한 조각을 포함한다.

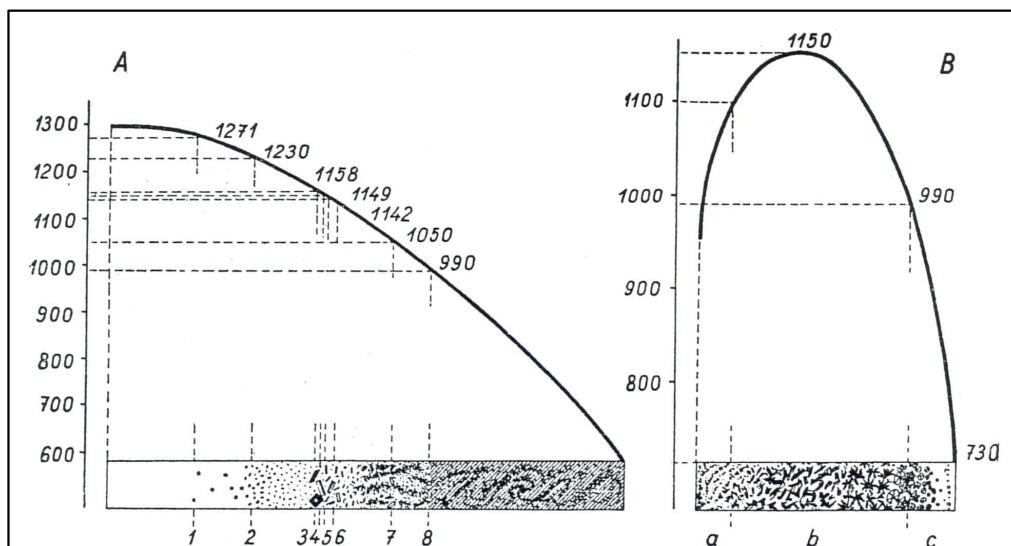


Fig. 2.1 Crystallization course of Libochovany alkali olivine glass in gradient boat within the temperature gradient of 1,300-600°C

Legend: 1- Magnetite segregation starting

2- Sudden increase of magnetite crystallization

3, 4, 5- Beginning of segregation of monoclinic pyroxene, plagioclase and monoclinic amphibole

6- Beginning of massive segregation of pyroxene, plagioclase and amphibole

7- Olivine segregation starting

8- Massive submicroscopic in the cross section of the wall of a Nova Bana basalt pipe (temperature in °C)

Legend: a- Inner surface layer of primary crystallization

b- Inner portion of primary crystallization

c- outer surface layer of secondary crystallization

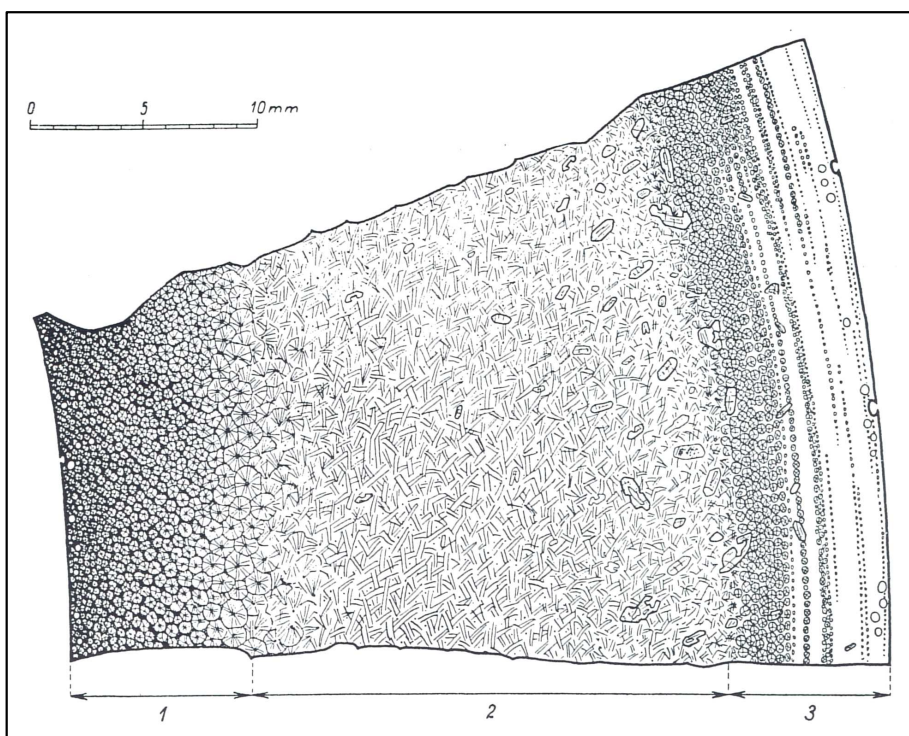


Fig 2.2 Schematic cross section of the wall of a pipe made from the alkali olivine basalt of Nova Bana(Slovakia)

- Legend:**
- 1-** Inner surface of primary crystallization displaying spherulitic texture made by monoclinic pyroxene and magnetite crystallization centers of spherulites. Dark mesostasis is residual glass; little spherical bubbles appear at the inner surface of the pipe.
 - 2-** Inner portion of primary crystallization displaying the directionless texture is composed of column-like crystals of monoclinic pyroxene, dendritic olivine (not shown) and of residual olivine grains which are cumulated along the outer zone of secondary crystallization.
 - 3-** Outer surface layer of secondary crystallization in its inner portion built by rhombic pyroxene spherulites with magnetite crystallization centers. Its outer portion is glass with spherulite streaks which are parallel with the surface of the casting; close to the surface are spherical bubbles. Contact with the inner portion of primary crystallization is sharp.

(3) 용융주조 현무암과 천연 현무암의 물성차이

슬라파니 광산 천연 현무암의 용융과 재결정은 그것의 기술적 요소에 매우 큰 영향을 미친다. 상기 재결정화에서 보여 주었듯이 결정면의 유리한 대표성, 잔존하는 유리상의 포함 그리고 결정된 구조물의 섬유화로 생산된다.

Table 2.9에서는 결정 현무암 구조물로 된 슬라파니 광산의 천연 현무암의 중요한 기술적인 요소의 상관관계를 보여 준다.

용융주조 현무암과 천연 현무암을 비교해 보면, 비중에 있어 천연 현무암이 평균값은 용융주조로 결정화된 현무암보다 다소 높다. 그러나, 내마모성, 마모 저항성, 압축강도, 굽힘강도 및 화학 저항성 등의 특성에 있어서는 결정화된 현무암 구조물에 비해 떨어짐을 낸다.

파쇄된 천연 현무암 암석들은 댐의 건설용 또는 철로(rail road) 자갈을 포함 하며 대부분이 건축용 골재로 사용될 것이다. 상기 표에서 보여준 것과 같이, 결정화된 현무암 구조물은 드러난 모든 요소에서 천연 슬라파니 현무암보다 우수하다.

슬라파니 광산의 재결정 현무암의 모스 경도 역시 흥미로운 특성에 해당된다. 그 값은 가장 높은 등급에 속하는 다이아몬드 모스 10 등급에 대해 모스 8등급 이다.

재결정화된 슬라파니 현무암의 용도는 흡수율이 0, 높은 결빙 저항성과 열 충격에 대하여 양호한 저항성을 갖는 많은 장점을 가진다.

Table 2.9 Correlation of technological parameters of natural and recrystallized basalt of Slapany

<div> <div>Classification</div> <div>Property</div> </div>		Slapany natural basalt		Crystallized basaltic castings	
Specific gravity	kg / m ³	(ϕ 3.040)	3.017~3.057	(ϕ 2.97)	2.934~3.010
Abrasivity	cm ³ / 50cm ²	(ϕ 6.2)	5.6~6.6	(ϕ 4.38)	3.96~4.92
Wear resistance	mm ³	(ϕ 143)	139~177	(ϕ 99)	83~109
Compression strength	MPa	(ϕ 250)	62~318	(ϕ 350)	309~483
Bending strength	MPa	(ϕ 28.8)	16.5~35.1	(ϕ 50)	48~64
Chemical resistance		Decrease wt. %		Decrease wt. %	
HCl	20.2% 108 °C	38		22	
H ₂ SO ₄	70.0% 170 °C	24		8.7	
NaOH	1.0% 100 °C	2		1.5	

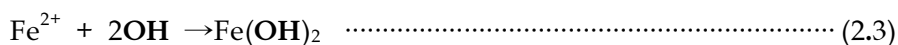
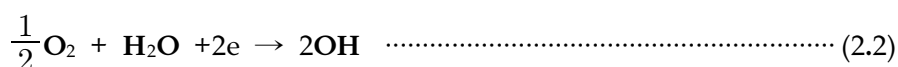
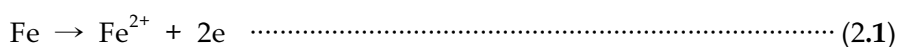
2.3 용융주조 현무암의 해수 중 내식성

부식은 금속(또는 합금)과 주위 환경 사이의 화학적 반응으로 야기되는 파괴적이고 해로운 결과이다. 본질적으로 금속 원자는 화합물(예: 광물) 내에 존재한다. 광물로부터 금속을 추출해 내기 위해서 요구되는 똑같은 양의 에너지가 부식을 야기시키는 화학반응 중에 방출된다. 부식은 금속이 추출된 광물과 똑같은 또는 유사한 화합물로 되돌려 놓는 역할을 한다. 따라서 부식은 추출야금(extractive metallurgy)의 반대 현상이라고 말할 수 있다^[27].

본 연구에서는 해수의 일반적 부식 특성을 먼저 살펴보고, 용융주조 현무암이 갖는 해수 중에 내식 특성을 살펴봄으로 본 철강-용융주조 현무암 복합파이프의 해수 중 다양한 적용 가능성을 알아보았다.

2.3.1 해수의 일반적 부식 특성^[28]

해양 환경중의 강구조물은 육상 구조물에 비하여 가혹한 부식환경하에 놓여져 있다. 해양환경중의 물이나 산소가 강 표면에 부착하면 전지(cell)와 유사한 전기화학적 반응에 의해 다음과 같이 녹(rust)이 발생하는 부식(corrosion)이 진행된다.



여기서, (1)식에서 나타내는 강의 산화용해 반응을 부식의 양극(anode)반응이라고 하고, (2)식에서 나타내는 산소의 환원반응을 부식의 음극(cathode)반응이라고 한다. (3)식의 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 는 (1)식과(2)식이 합쳐져 반응한 부식부산물(초기 녹)으로써 강의 표면에서 생성된 후 시간 경과와 더불어 주변 환경 인자의 영향에 의해 산화 등의 과정을 거쳐서 여러 가지 형태의 복잡한 수화 산화철(녹)로 변환된다.

2.3.2 용융주조 현무암의 해수 중 내식 특성

해수 중 강구조물을 방식하는 방법에는 여러 종류가 있으며 이들의 방법을 대별하면 다음과 같다.

가. 양극방식법: 피방식체를 양극으로 하여 방식체 표면에 부동태피막을 형성시켜 방식하는 방법

나. 외부전원법: 외부전원을 인가하여 방식하고자하는 피방식체를 음극화하여 방식하는 방법

다. 희생양극법: 방식하고자 하는 피방식체보다 전위가 낮은 비금속 아연, 알루미늄, 마그네슘 합금 등을 연결하여 방식하는 방법

라. 피복방식법 : 피복 방식법은 피방식체의 표면을 여러 가지 방법에 의해서 부식매질인 물과 산소의 공급을 차단하는 방법이며, 그 종류는 다음과 같다.

- a. 무기라이닝법
- b. 금속용사법
- c. 도장법
- d. 유기라이닝법
- e. 페트로라텀라이닝법
- f. 금속표면처리법(도금법)

철강-용융주조 현무암 복합파이프는 상기 방식법 중에서 피복 방식법의 무기라이닝법으로 분류할 수 있다.

해수를 이송하는 배관은 이송되는 해수의 양에 따라 파이프 내면 상부는 대기에 노출 되며, 중간부는 비말대와 간말대가 중첩되고 하부는 해수 중에 놓이게 된다. 또 준설선과 같이 해저 토부를 준설하여 해토를 이송하는 배관은 해수에 의한 부식과 마모를 동시에 고려하여야 한다.

3. 사용재료 및 실험방법

3.1 사용재료

본 연구에 사용된 재료는 용융주조 현무암 파이프, 모르타르, 철강재 파이프와 플랜지 등이다. 주 재료인 용융주조 현무암의 조성과 물성을 조사하고 현무암과 철강재 파이프를 연결하는 모르타르의 특성에 대하여 살펴보았다. 철강재 파이프의 실험 재료 물성에 관한 연구는 이미 많이 되어 있기에 생략하였다.

3.1.1 용융주조 현무암의 조성과 물성

(1) 용융주조 현무암 파이프의 조성

자연상태에 분포하고 있는 강성 현무암 중에서 비교적 조직이 치밀하고 고르며, 용융 후 재결정화 과정에서 다량의 핵을 형성하고 그 구조가 골격 구조와 덴드라이트상을 갖춘 불순물이 적게 포함된 원석이 현무암 원료로 사용될 수 있다. **Table 1**은 현무암 원료로 쓰이는 슬라파니 광산의 현무암 원석의 화학조성을 나타낸다. 성분 중 산화규소 (SiO_2)가 약 45.8%를 차지하고 알루미늄(Al_2O_3)과 산화철(Fe_2O_3)이 각각 약 12% 내외의 성분을 차지하고 있으며 기타 산화칼슘(CaO)과 산화마그네슘(MgO) 및 산화칼륨(K_2O) 등이 포함되어 있다^[30].

시료를 박편으로 제작한 후, 독일의 LEICA 편광 현미경으로 슬라파니 현무암석의 광물 성분을 조사한 결과, **Table 3.2**와 같이 장석(feldspar) 51vol%, 휘석(pyroxene) 26vol%, 각섬석(amphibole) 13vol%, 불투명 광물(opaque mineral) 9vol% 기타 소량의 석영(quartz), 인회석(apatite), 녹립석(Epidote), 갈철석(Limonite)이 나타났으며, 편광현미경으로 관찰 사진을 **Photo 3.1**과 **3.2**에 나타낸다^[31].

Table 3.1 Chemical components of basalt^[30]

Component	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	P.P.P
Ratio(%)	45.8	2.26	11.5	11.8	11.4	10.5	1.17	0.4

Table 3.2 Analysis of basalt minerals by polarization microscope^[31]

Classification of mineral	Ratio(vol. %)
Quartz	tr
Feldspar	51
Muscovite	-
Biotite	-
Garnet	-
Pyroxene	26
Apatite	tr
Epidote	tr
Amphibole	13
Sericite	-
Opaque mineral	9
Chlorite	-
Limonite	tr
Calcite	-
Sillimanite	-
Spene	-
Clays	-
Tourmaline	-

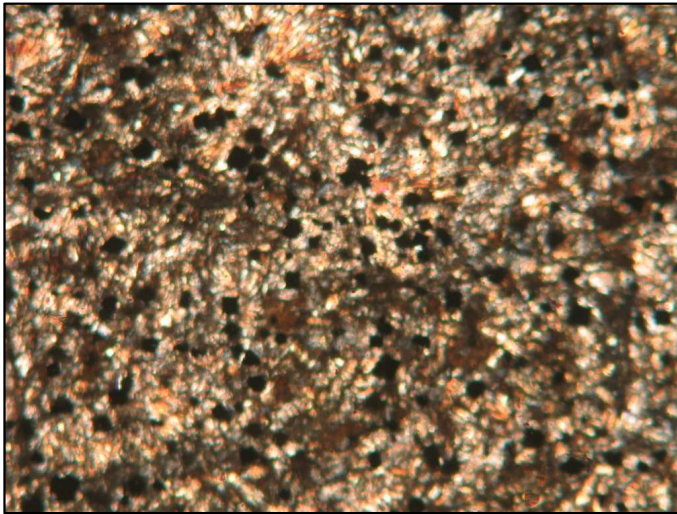


Photo 3.1 Cross nicol of basalt by polarization microscope ($\times 100$)

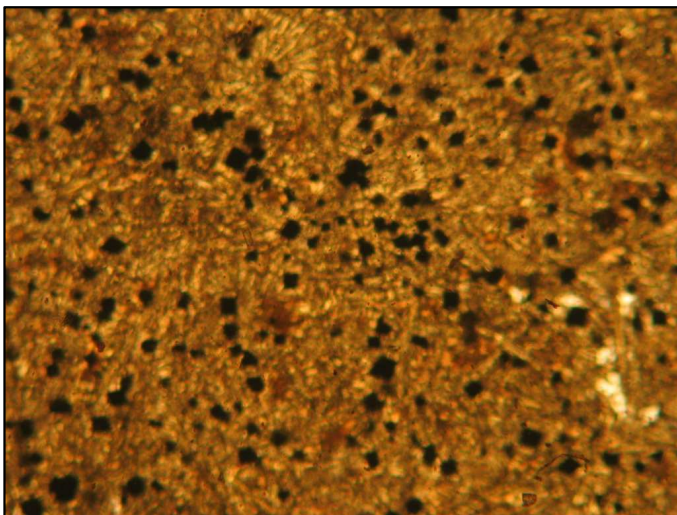


Photo 3.2 Open nicol of basalt by polarization microscope ($\times 100$)

(2) 용융주조 현무암 파이프의 물성

Table 3.3은 용융주조 현무암의 기계적 성질을 나타낸다. 현무암은 그 자체가 모스경도 8로서 상당히 높은 경도를 가진 광석임을 알 수 있고, 여타의 취성재료처럼, 압축강도는 매우 높지만 인장 강도는 매우 낮다는 특성을 보이고 있다. 압축강도의 측정은 보통은 취성재료 압축시험편을 만들어 측정하나, 인장강도의 측정은 금속재료와 같은 인장시험편을 만들 수 없으므로 3점 굽힘 시험편을 만들고 이 시험으로부터 인장강도를 구한다. 현무암의 열팽창계수는 연강의 2/3 수준으로 온도변화에 대한 팽창과 수축의 차이가 있다. 따라서 연강과 현무암의 복합재료 파이프를 만들고 난 후, 온도변화가 있을 때에 연강의 수축 팽창과 현무암의 수축 팽창의 차이를 흡수해주는 조치가 필요하다.

현무암의 열전도계수는 연강의 1/20 정도로서 보온성이 상당히 좋다. 탄성계수는 연강의 1/2 정도이며 전기저항은 $10G\Omega$ 으로 완전 절연체라고 볼 수 있다. 현무암의 융점은 $1,200^{\circ}\text{C}$ 이나 현무암 주조 시, 주형에 용융액을 부을 때에 유동성이 좋아야 하므로 융점보다 더 높은 온도로 가열하여야 한다. 약 $1,300^{\circ}\text{C}$ 정도로 가열 용해시켜야 주조가 잘 될 것으로 예상된다. 그런데 대부분의 전기로가 고주파로이고 현무암은 자성체가 아니므로 고주파로를 가지고서는 현무암을 가열할 수 없기 때문에 녹일 수가 없다. 따라서, 전기저항으로 $1,300^{\circ}\text{C}$ 이상에서 견딜 수 있는 SiC 발열체를 이용한 전기로를 사용하는 것이 가능하지만 이는 실험실에서 소량으로 용융할 때에 사용되고, 산업용으로 대량 용융 할 때에는 개방형 하스 로(open hearth furnace)를 이용하여, 가열 원료는 가스를 사용한다. 가스를 사용함으로써 에너지 비용도 비교적 적게 들고, 비자성체인 현무암을 높은 온도까지 가열 할 수 있는 장점이 있다. 다만 가스로는 온도 제어시스템이 전기로만큼 간단하지가 않다는 것을 염두에 두어야 할 것이다.

Table 3.3 Mechanical properties of fused cast basalt^[32]

Hardness	Mohs hardness 8
Compressive strength	300~450MPa
Bending strength	45MPa
Density	2,900~3,000kg/m ³
Coefficient of thermal expansion	$8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (0 [°] C~100 [°] C)
Coefficient of thermal expansion	$9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (100 [°] C~400 [°] C)
Coefficient of heat conductivity	1.9~2.2 W/(m [°] C)
Elastic modules	110MPa
Melting point	1,200 [°] C
Insulation resistance	10G Ω
Vickers hardness(ISO409-1)	700~800 Hv

3.1.2 모르타르(Mortar)의 조성 및 구비조건

현무암 튜브를 철강 파이프 안에 밀어 넣고 양자를 접착하는데 쓸 수 있는 접착제는 무수히 많다. 철강 파이프와 현무암 튜브가 직접 닿고 그 사이에 접착제를 사용하여 붙인다면 철강 파이프가 받게 될지도 모르는 외부 충격을 그대로 현무암 튜브에 전달하기 때문에 충격에 취약한 현무암 튜브가 견디기 어려울 것이다. 그러므로 철강 파이프와 현무암 튜브사이에 약간의 공간을 두고 여기에 모르타르를 주입하여 이 양자를 접착하면 외부 충격을 이 모르타르가 상당량 흡수할 수 있을 것이고 현무암 튜브에 전달된 충격력은 많이 완화된다.

건축용으로 개발 생산된 모르타르는 무수히 많이 있는데 이 중에서 철강-현무암 복합재료 파이프의 제작에 적합하려면 다음의 요건을 만족해야 한다.

가. 접착전단강도가 클 것.

나. 양생 후 수축이나 팽창이 없을 것.

다. 철강, 현무암, 해수와 접촉하여 화학적 변화가 없을 것.

라. 가격이 저렴할 것.

마. 피로수명 등 내구성이 충분할 것.

바. 배합이나 시공이 용이할 것.

사. 충격흡수가 클 것.

아. 양생 전 유동성이 좋을 것.

이러한 조건을 비교적 골고루 구비한 모르타르로 **Table 3.4**에 나타난 비율로 배합한 것을 들 수가 있다.

이 배합에서 세일콘(Seilcon)을 제외하면 보통의 건축용 모르타르와 거의 다를 바가 없다. 여기서 세일콘은 모르타르가 양생할 때에 수축하는 것을 방지하고 모르타르의 유동성을 향상시켜 내부의 기포 발생을 줄이는 역할을 한다. 이렇게 배합된 모르타르는 양생 후 수축이 전혀 없었고 접착강도도 충분하였다. 이들을 배합 할 때의 주의사항은 다음과 같다.

가. 물은 깨끗한 담수를 사용할 것.

나. 혼합시간은 3분 이상으로 하여 충분히 섞이도록 할 것.

다. 물의 온도는 20℃ 이상으로 할 것.

라. 혼합 후 60분이 경과하면 폐기처분할 것.

Table 3.4 Mixed ratio of mortar materials

Seilcon	Cement	Sand	Water
1kg	10kg	10kg	3.5kg

3.2 실험 방법

3.2.1 3점 굽힘시험

(1) 시료채취

시료는 용융주조 현무암 $L200 \times W200 \times T22\text{mm}$ 의 타일을 인조다이아몬드 커터 (cutter) 및 연마기로 $L200 \times W100 \times T18\text{mm}$ 가공 후, 시험에 필요한 공시체를 만들었다.

(2) 시험온도

시험온도는 상온, 200°C , 300°C 의 3가지 온도에서 각각 실시하였다.

(3) 시험방법

Fig. 3.1과 같이 하부 지지대 지점의 간격은 130mm 로 하고, 그 중심이 되는 65mm 지점에서 하중을 가하였다. **Photo 3.3**은 3점 굽힘시험기에 시험편을 걸어 하중을 가하고 있는 모습을 나타낸다.

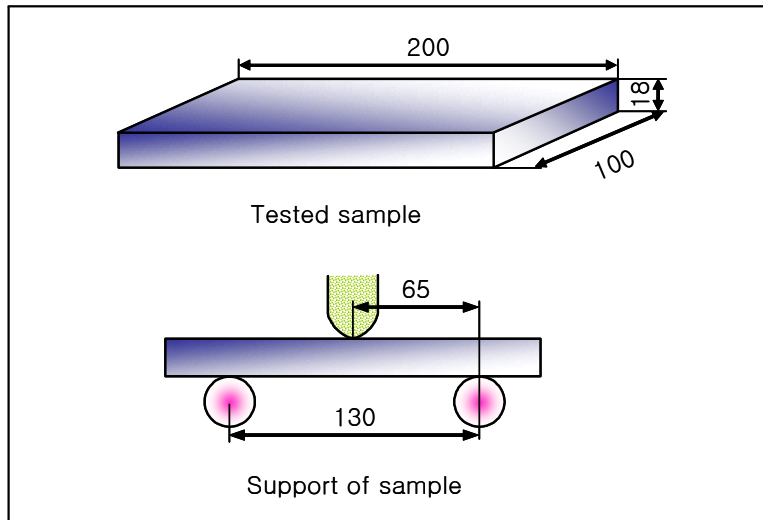


Fig. 3.1 Schematic of bending strength test

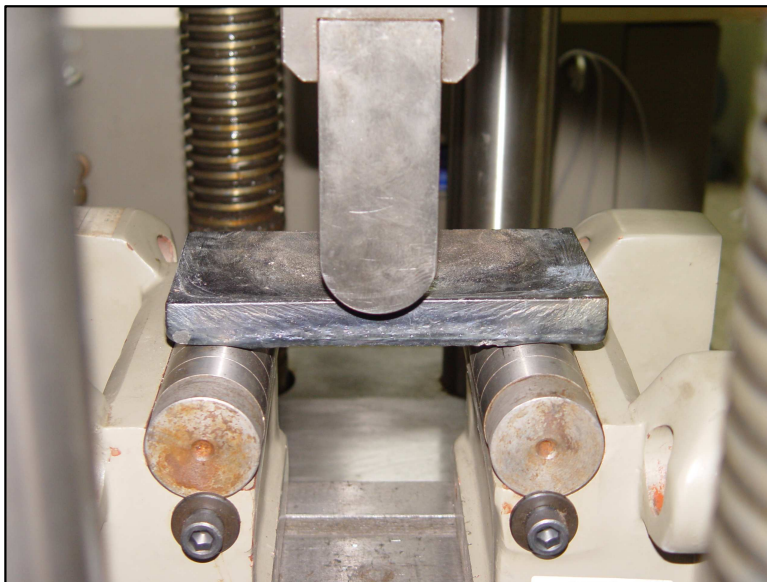


Photo 3.3 Test method of bending strength

3.2.2 압축강도^[33]

천연산 석재의 압축강도시험방법에 따라 인용규격 KS F 2519:2001 콘크리트 압축강도시험방법의 규정으로 시험을 하였다.

(1) 시료채취

시료는 용융주조 현무암 L200×W200×T50mm의 타일을 인조다이아몬드 커터(cutter)하여 L40×W40×T40mm로 가공 후, 시험에 필요한 공시체를 만들었다.

(2) 시험기구

Photo 3.4와 같이 만능재료시험기(ZWICK Z-600E)를 이용하여 용융주조 현무암의 압축강도 시험을 행하였다.

(3) 시험조건

건조상태에서 시험을 행하고 공시체는 $60\pm2^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 48시간동안 건조시켰으며, 46시간, 47시간, 48시간째에서 공시체의 무게가 동일하게 유지 되었다.

(4) 시험방법

시료를 시험기의 중앙에 놓고 시료위에 접촉판을 손으로 조정할 수 있을 정도의 비율로 초기하중을 가하였다. 구형의 블록을 적절하게 얹힌 작은 하중하에서 접촉판을 30도 각도로 앞뒤로 회전시켰다. 시료가 중앙의 위치에서 벗어나지 않도록 주의하였으며, 하중의 재하는 매분 약 1mm의 속도로 매초 약 1MPa(=N/mm²)의 하중을 일정하게 가하였다.

(5) 계산

공시체의 압축강도는 다음 식에 따라 계산하였다.

$$C = \frac{W}{A} \dots\dots\dots (3.1)$$

여기에서 C : 공시체의 압축강도 MPa(=N/mm²)

W : 공시체의 파괴하중(N)

A : 공시체의 하중지지면(mm²)

시험값은 1MPa(=N/mm²)의 정밀도로 구한다.



Photo 3.4 Test method of compression strength

3.2.3 내식성^[34]

용융주조 현무암의 내식성을 평가하기 위하여 중성의 염화나트륨 용액을 분무한 분위기에서 내식성을 조사하는 중성염수분무시험(neutral salt spray test)을 행하였다.

(1) 시험액의 조제순서 및 장치

시험액은 다음 순서로 조제 하였다

가. 수지제 또는 유리제 등의 용기에 $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 도전율 $20\mu\text{S}/\text{cm}$ (또는 $2\text{ms}/\text{m}$)이하인 증류수를 적당량 넣었다.

나. 염화나트륨(NaCl)은 KS M ISO 6353-2(R32)에서 규정하는 특급 또는 그 동등 이상을 사용하였으며, 시험액 1ℓ 당 $50\pm 5\text{g}$ 이 되도록 용해하였다.

다. pH를 6.5가 되도록 KS M ISO 6353-2(R32)에서 규정하는 수산화나트륨(NaOH) 용액으로 조정한 후, 용액을 충분히 휘저은 다음 25°C 에서 비중이 $0.029\sim 0.036$ 이 되도록 하였다.

(2) 장치

이 시험에 필요한 장치는 분무탑 또는 분무 노즐, 염수 탱크, 시험편 유지기와 분무액 채취용기 등을 갖춘 항온항습의 시험조 그리고 염수 보급탱크, 공기 포화기, 압축공기 공급기 및 배기장치 등으로 구성되며, 다음의 조건을 만족한다.

가. 장치의 재료는 염수의 부식성에 영향을 주거나 그것 자체가 부식되는 재료가 아니다.

나. 시험조는 0.25m^3 이상의 용적이다.

다. 염수를 시험편에 직접분무하지 않도록 하였으며, 또한 천장에 고인 염수의 방울이 시험편의 위에 떨어지지 않도록 하였다.

라. 시험편에서 떨어진 염수를 재시험에 사용하지 않았다.

마. 소금용액을 분무하기 위한 압축 공기는 기름 및 먼지를 제거하고 압력은

70~167kPa범위로 하였다.

바. 분무액 채취 용기는 수평채취면적 80cm²의 깨끗한 용기로 하였으며 분무의 균일성을 확인할 수 있는 2개소 이상의 위치에 놓았다. 부기를 들면, 시험편근처에서 하나는 분무탐 또는 분무 노즐에 가깝게, 다른 하나는 먼 곳에 놓았다.

사. 분무액량은 분무시간을 통하여 1시간당 1.0~2.0ml의 소금용액이 각각의 채취용기에 모이도록 하였다.

아. 시험조 안의 온도는 35±2℃, 염수 탱크의 온도는 35±2℃, 공기포화기의 온도는 47±2℃로 유지하였다.

(3) 시험편의 유지

시험 중, 시험조 내에서의 시험편의 위치는 다음 조건을 만족한다.

가. 시험편의 시험면은 수직에 대하여 20°(허용되는 범위로서 15°~30°)가 되도록 유지하였고, 소금용액의 자유낙하에만 노출되는 위치 또는 노출되는 방향으로 놓았다.

나. 시험편은 다른 시험편에 대한 소금용액의 분무자유낙하를 방해하지 않도록 하였다.

다. 시험편은 지지틀 이외의 것에 닿지 않도록 하였다

라. 시험편으로부터 소금용액 방울이 다른 시험편에 떨어지지 않도록 하였다.

마. 시험편 식별의 각인, 부착 구멍 등은 아래쪽을 향하도록 하였다.

(4) 조작

시험조 내의 온도는 35℃, 염수탱크의 온도는 35℃, 그리고 공기포화기의 온도가 47℃에 도달한 후, 소금용액을 분무하기 위한 노즐로 보내는 압축공기의 압력을 70~167kPa로 유지하고 분무를 시작하였다.

가. 시험조건은 아래 **Table 3.6**과 같으며, **Photo 3.5**에 염수분무 시험 사진을 나타낸다.

나. 시험시간은 24 시간으로 하였으며, 시험 시간 중에는 분무를 중단하지 않고 연속 분무를 하였다.

다. 시험 후 처리

시험이 끝나면 소금용액의 방울이 시험편에 떨어지지 않도록 시험조의 덮개를 열고 평가대상 면을 손상하지 않도록 시험편을 꺼내서 시험편의 표면에 고착한 염분을 제거하기 위하여 신속하게 물로 씻은 다음, 술, 스펀지 등을 사용하여 부식점 이외의 부식생성물을 제거하였다.

Table 3.6 Test Conditions of neutral salt spray test

Item	Preparation	Test
Density of NaCl (g/l)	50±5	50±5
pH	6.5	6.5~7.5
Quantity of spray (ml/80 cm ² /h)		1.5±0.5
Temperature of test vessel (°C)		35±2
Temperature of salt water tank (°C)		35±2
Temperature of saturated air (°C)		47±2
Compression of compressed air (kPa)		70~167



Photo 3.5 Test method of neutral salt spray

3.2.4 경도^[35]

본 경도 시험은 KS B0811:2003의 '금속 재료의 비커스 경도 시험 방법'에 의거, 시험하중(F)의 범위는 $F=9.807\text{N}$ 으로 하였으며, 0.2kg 의 저하중 비커스 경도시험을 실시하였다. 이 규격은 0.020mm와 1.400mm이인 압입 자국의 대각선 길이에 대한 비커스 경도시험방법을 규정하고 있다.

(1) 원리

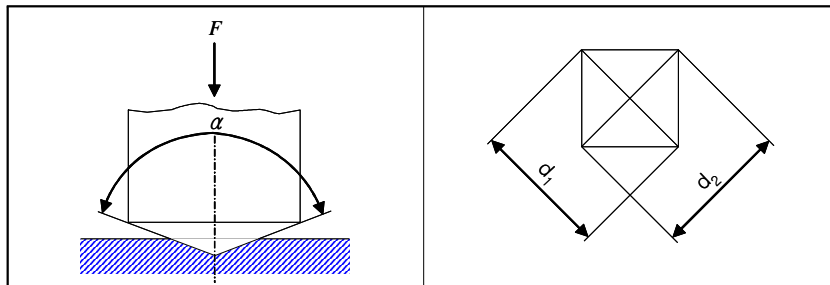
비커스 경도 시험의 원리는 136° 인 피라미드 형태의 다이아몬드 압자를 시험편에 압입하며 이때 가해지는 하중은 10초를 초과하지 않는다. Fig. 3.2와 같이 시험하중(F)의 제거 후에 남아있는 표면 압입 자국의 대각선 길이를 측정한다. 비커스 경도는 직각 피라미드 형태를 갖는 자국의 경사면적을 시험하중으로 나눈 값에 비례한다.

(2) 시험방법

Photo 3.6은 경도 시험 사진을 나타내며, 제품규격에 규정된 것과는 별도로 시험은 압입자국의 대각선 길이를 정확하게 측정할 수 있도록 산화물, 이물질 및 윤활제를 완전히 제거하여 매끄럽고 평평한 표면위에서 수행하였다.

시험편의 준비는 열간 가공 또는 냉간가공으로 인한 표면변화를 최소화하는 방법으로 수행되어야 하였으며, 비커스 마이크로 경도의 압입자국은 얇은 깊이를 갖기 때문에 준비 작업 중에 특별한 예방조치를 취하였고, 표면은 적절하게 연마하였다.

시험편의 두께는 압입자국의 대각선 길이 대비 최소 1.5배 이상으로 하였으며, 시험 후에 시험편 뒷면에 변형도 없었다.



α : An angle of 136° between opposite faces of a right pyramid with a square base

$F(N)$: Test load(N)

$D(mm)$: Average length of between d_1 and d_2

$$H_v = \frac{\text{Testload}}{\text{Surface area of impacted portion}} \times \text{Constant}$$

$$0.102 = \frac{2F \sin 136^\circ}{d^2} \approx 0.1891 \frac{F}{d^2}$$

$$\text{Constant} = \frac{1}{g_n} = \frac{1}{9.80665} \approx 0.102$$

Fig. 3.2 Principles of Vickers hardness test



Photo 3.6 Test method of Vickers hardness

3.2.5 흡수율^[36]

(1) 시료 채취

시료는 대표적인 것을 채취해야하며, 3개 이상의 공시체를 만들 수 있을 정도의 크기로 채취하였다. 석재의 성질상 변화가 있다고 인정될 경우에는 그 한계를 가릴 수 있을 정도의 시료로 하였다.

공시체는 치수 5~8cm의 육면체, 프리즘, 원기둥 또는 다른 규칙적인 형태의 것이어야 하였으며, 표면적에 대한 부피의 비율이 0.8~1.4인 것이어야 하였다. 모든 표면은 톱질한 표면이나 코어로 채취한 표면정도로 편평하게 하였으며, 이보다 거친 표면은 연마분으로 손질하였다. 끝이나 이와 유사한 기구로 손질하지 않았고, 시료마다 3개 이상의 공시체를 만들었다.

(2) 시험방법

공시체를 통기장치가 된 건조기 속에서 $105\pm2^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 24시간 동안 건조시켜, 실내에서 30분 동안 식힌 후 질량을 측정한다. 공시체를 식힌 후, 즉시 측정할 수 없을 때는 데시케이터 속에 보관해야하였다. 무게는 0.1g의 정밀도로 측정해야 하였다.

공시체를 온도($20\pm5^{\circ}\text{C}$) 증류수나 여과수 속에 48시간동안 침수시킨 후 공시체를 수조에서 동시에 꺼내어 표면을 젖은 헝겊으로 닦아내고 0.1g의 정밀도로 측정하였다.

(3) 계산 및 기록

각 공시체의 흡수율은 다음 식에 따라 계산하였다.

$$\text{흡수율}(\%) = \frac{B-A}{A} \times 100 \dots\dots\dots (3.2)$$

여기에서 A: 건조공시체의 질량(g)

B : 침수 후 공시체의 질량(g)

3.2.6 비중

(1) 시험방법

가. 흡수율 시험에 사용하였던 공시체를 비중시험을 끝낸 직후, 포화된 공시체를 온도(20±5)℃의 여과수나 증류수 속에 매달고 0.1g의 정밀도로 측정해야 하였다.

나. 바스켓의 질량은 공시체의 질량을 측정하였을 때의 값으로 넣어 측정하였으며, 이때 공시체나 바스켓에 붙은 기포는 측정하기 전에 제거해야 하였다. 공시체의 물 속 질량은 공시체와 바스켓이 합쳐진 질량에서 바스켓의 질량을 빼서 구하였다.

(2) 계산

가. 표면건조 포화상태의 비중은 다음 식에 따라 계산하였다.

$$\text{표면건조 포화상태의 비중} = \frac{A}{B - C} \dots\dots\dots (3.3)$$

여기에서 A : 공시체의 건조 질량 (g)

B : 공시체의 침수 후, 표면 건조 포화상태의 공시체의 질량 (g)

C : 공시체의 물속 질량 (g)

나. 계산 결과는 공시체의 평균값으로 하며, 결과는 0.01의 정밀도로 구해야 한다. 이때 최고 및 최저 값도 기록해 두었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 용융주조 현무암의 물성

4.1.1 3점 굽힘시험

용융주조 현무암 주조품에 대하여 고온에서의 기계적 성질을 알아보기 위하여 3점 굽힘시험편을 만들고 시험기에 걸어서 시험을 실시하였다. 시험온도는 상온, 200℃ 및 300℃의 3가지 온도에서 실시하였다.

Fig. 4.1는 상온에서의 시험결과이다. 총 6개의 시험편을 시험하였는데 파단하중이 727kgf에서 911kgf로 보통의 세라믹 재료와 동일하게 편차가 약간 있었다. 이 하중을 응력으로 환산하면 42.9MPa에서 53.8MPa에 해당한다.

파이프의 내면에 고온의 유체가 흐를 경우를 대비하여 이송되는 물질과 직접 접촉하는 용융주조 현무암 파이프를 200℃와 300℃의 조건에서 기계적 특성을 실험한 결과를 **Fig. 4.2**과 **Fig. 4.3**에 나타낸다.

Fig. 4.2은 200℃에서의 시험결과이다. 이 온도에서도 총 6개의 시험편을 시험하였는데 파단하중의 범위가 495kgf에서 744kgf로 편차가 더욱 컸다. 이 하중을 응력으로 환산하면 29.2MPa에서 43.9MPa에 해당한다.

Fig. 4.3는 300℃에서의 시험 결과이다. 이 온도에서는 총 5개의 시험편을 시험하였는데 파단하중의 범위가 195kgf에서 522kgf로 그 편차가 대단히 심하여 재현성이 없다고 볼 수 있었다. 이 하중을 응력으로 환산하면 11.5MPa에서 30.8MPa에 해당한다.

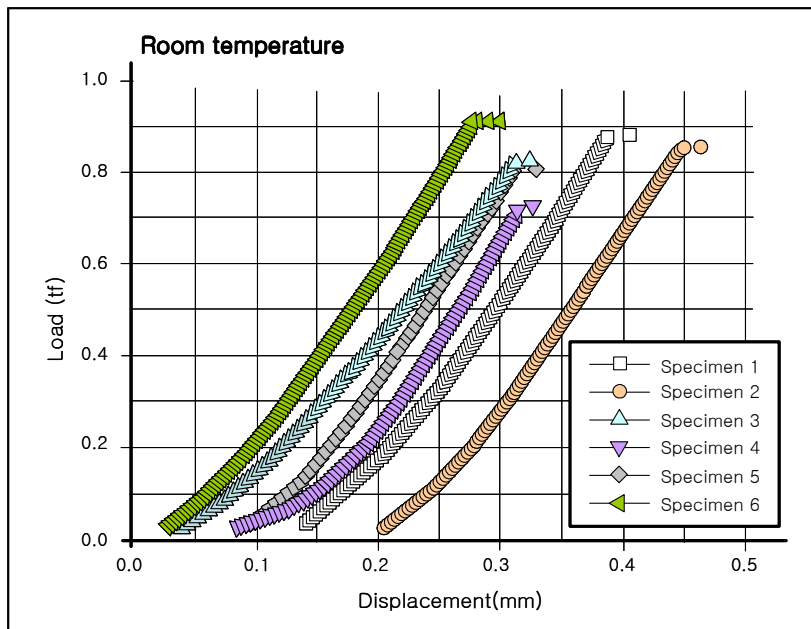


Fig. 4.1 Test results of bending strength at room temperature

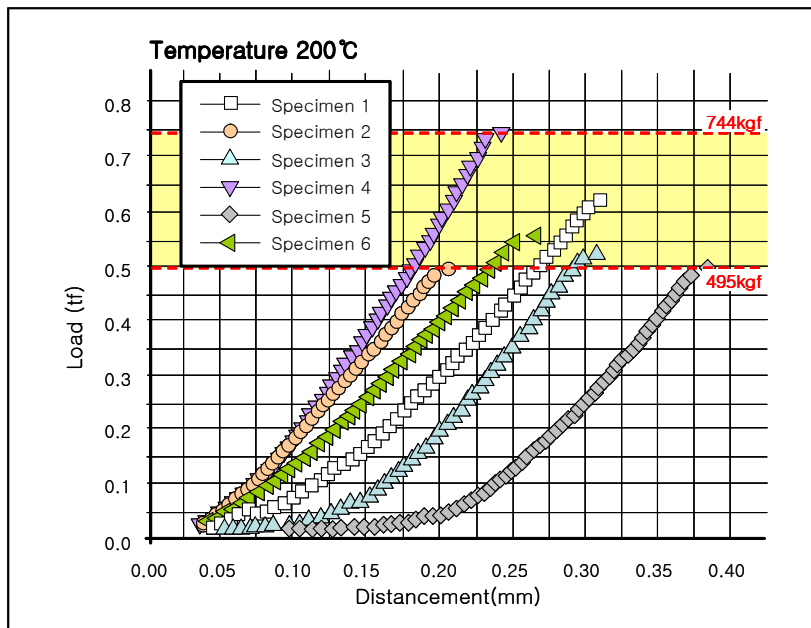


Fig. 4.2 Test results of bending strength at 200°C

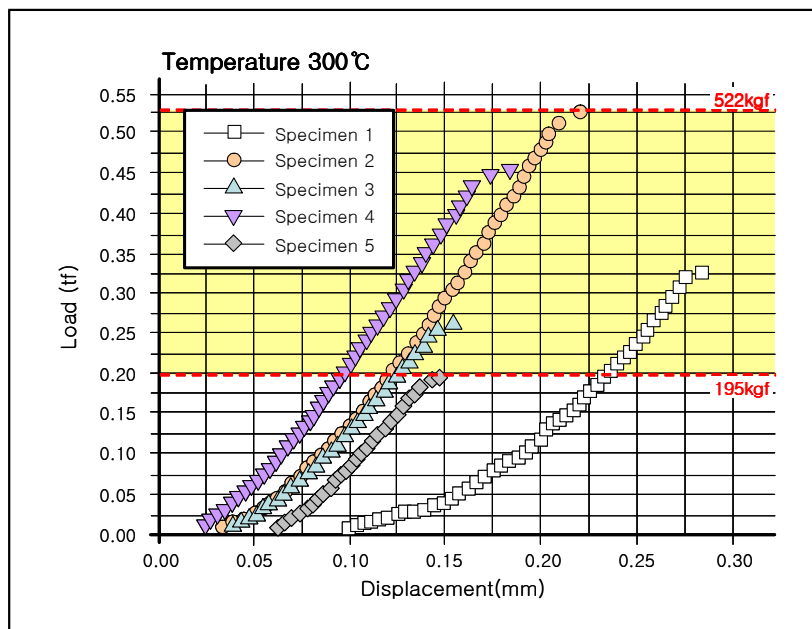


Fig. 4.3 Test results of **bending strength** at 300°C

4.1.2 압축강도

용융주조 현무암 주조품에 대하여 고압에서의 기계적 성질을 알아보기 위하여 3.2.2 언급한 바와 같이, KS F 2519:2001 콘크리트 압축강도 시험방법의 규정에 따라 시험편의 규격을 $L40 \times W40 \times T40\text{mm}$ 로 3개 가공한 후 만능재료시험기 (ZWICK Z-600E)를 이용하여 시험한 결과를 Fig. 4.4와 같이 349MPa, 339MPa 및 358MPa를 나타내었다.

이의 평균값은 349MPa로 28일간 양생한 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 압축강도는 30MPa 이상의 값으로 약 10배 이상의 높음을 의미하였다.

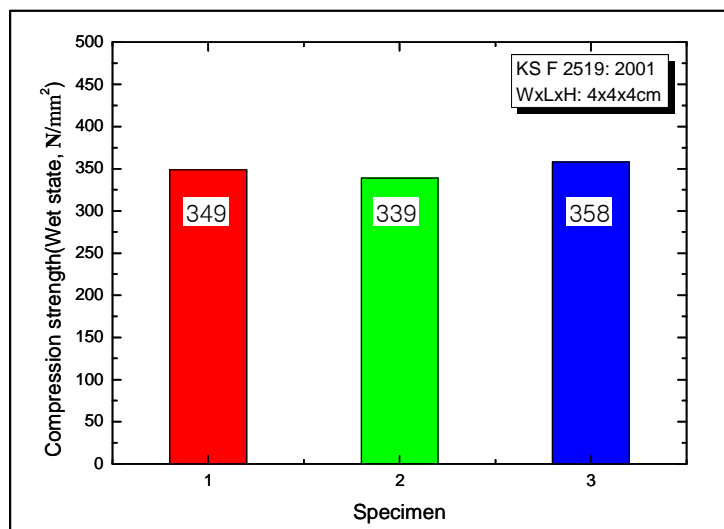


Fig. 4.4 Test of compression strength

4.1.3 내식성

해수배관은 **Fig. 4.5**에 나타낸 것과 같이 이송되는 해수의 유량에 따라 파이프 내면의 상부는 대기에 노출되기도 하며, 중간부는 비말대나 간말대와 비슷한 환경에 처하게 된다. 또한 준설선과 같이 해저 토부를 준설하여 해토를 이송하는 배관은 해수에 의한 부식과 마모를 동시에 고려하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 해수를 이송하는 배관의 범위를 넓게 해석하였으며, 재료의 내식특성은 3.2.2장에서 언급한 바와 같이 **KS D 9502:2002**에 준하여 실험하였다.

0.029~0.036의 농도를 갖는 염수 중 시편을 24시간 노출시킨 후, 시편의 외관을 육안으로 관찰한 결과 녹과 같은 부식물질은 발견되지 않았으며, 확대 관찰 결과 레이팅 넘버 **RN=10**에 해당할 만큼 무결한 표면상태를 유지했다. **Photo. 4.1**에 염수분무시험 전후의 표면 사진을 나타낸다.

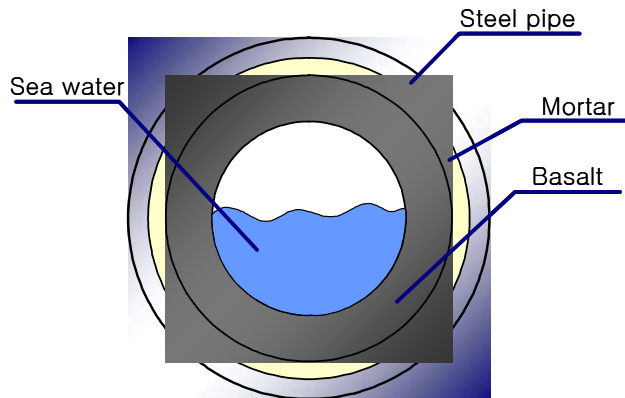
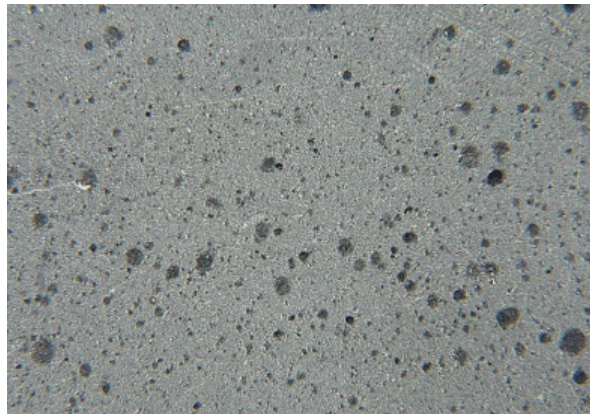


Fig. 4.5 Cross section of steel-fused cast basalt lined composite pipe for transporting sea water



(a) Before test



(b) After test

Photo. 4.1 Photo of specimen before/after salt spray test

4.1.4 경도

사이즈 L40×W40×T40mm의 시편 3개를 KS B 0811:2003의 '금속 재료의 비커스 경도 시험 방법'에 의거 시험하중(F)를 9.807N으로 하여 경도를 측정한 결과 Fig. 4.6과 같이 각각 727, 712, 703Hv의 균일한 값을 얻었다. 이의 평균 경도 값은 714Hv를 나타내고 있으며, 망간강은 633~697Hv 그리고 크롬강은 595~720Hv로 망간강과 크롬강보다 다소 높으며, 스테인리스강과 비슷한 값을 나타내었다.

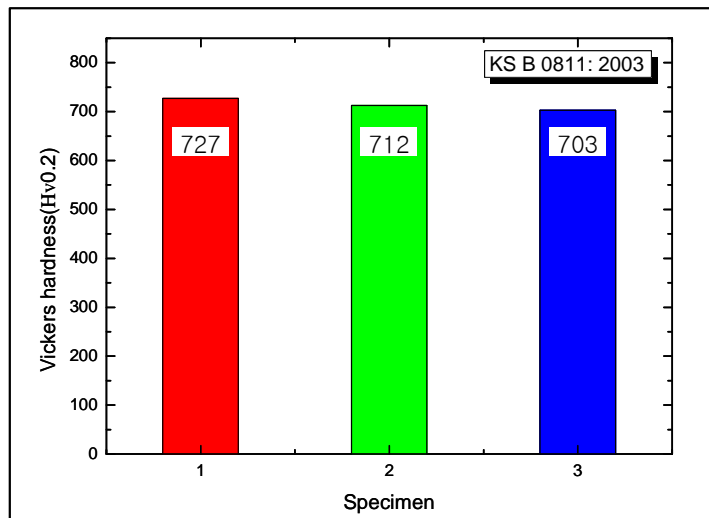


Fig. 4.6 Test result of Vickers hardness

4.1.5 흡수율 및 비중

흡수율과 비중은 3.2.4절에 언급한 바와 같이, KS F 2518:2005에 의거하여 측정하였으며, 그 측정결과를 Fig. 4.7와 4.8에 나타낸다.

흡수율의 경우, 평균 0.055%의 값을 보이고 있다. 이는 콘크리트 10~20%, 건축용 세라믹 자재 1% 미만에 비해 상대적으로 낮은 값을 나타내었는데, 이는 용융 주조 현무암의 내부 조직이 그만큼 치밀함을 의미하는 것이기도 하다.

또한, 비중은 세 개의 공시체 모두 동일하게 2.87을 나타내었다.

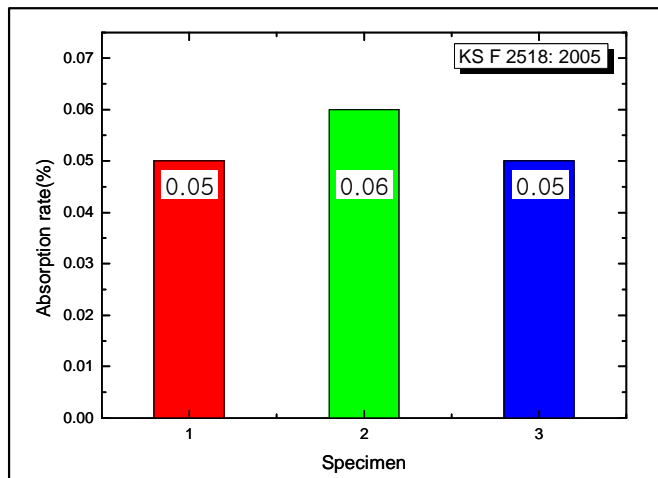


Fig. 4.7 Test result of absorption

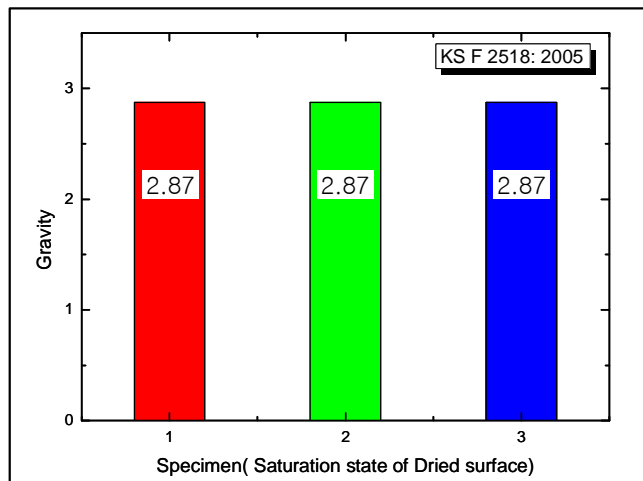


Fig. 4.8 Test result of specific gravity

4.2 복합재료 파이프 시제품의 제작과 그 특성

4.2.1 용융주조 현무암 튜브

가스조에 현무암 원석덩어리를 넣고 1,300℃까지 가열하여 용융액을 얻고 이 액체를 미리 준비한 주형에 부어 현무암 튜브를 제작하였다.

Fig. 4.9는 현무암 튜브를 주조하는 설명도이다. 철강 파이프를 길이 방향으로 절단하여 두 조각으로 만들고, 절단 가장자리에 플렌지를 용접하여 부착한 다음 볼트구멍을 뚫고 볼트를 끼워서 조립하면 파이프가 되도록 하였다. 이 파이프를 이와 꼭 맞는 바닥판(bottom disk)에 끼워 넣고 이 안에 주물사로 만든 원기둥을 세워 넣는다. 바닥판의 중심에는 볼트구멍을 뚫고 모래기둥의 스테드 볼트를 끼울 수 있게 하였다. 이 모래기둥은 모래만 가지고는 만들 수 없고 모래에 시멘트 약간과 물을 배합하여 원통 그릇에 다져 넣어 만들었다. 원통 그릇에 다져 넣을 때는 양생 후 모래기둥이 원통 그릇 면에 접촉되지 않도록 그릇 면에다 이형제를 얇게 바른다. 모래기둥을 만들 때에 상하의 축 중심선에 스테드 볼트를 심어서 모래기둥이 정확한 위치를 잡을 수 있도록 하였다. 모래와 시멘트 및 물로 모래 기둥을 만들 때에 시멘트가 너무 많으면 모래기둥이 너무 단단하여 현무암 주조가 끝나고 주물사(모래기둥)를 털어 낼 때에 현무암 주물이 깨어지는 수가 있어 주물사를 털어내기가 어렵고, 시멘트가 너무 작으면 스테드 볼트를 체결할 때에 볼트가 빠질 수도 있다. 대략 중량비로 모래와 시멘트를 10:1의 비율로 섞으면 되고 스테드 볼트를 너무 세게 조이지 않도록 주의하여야 한다. 모래기둥의 상부에 있는 스테드 볼트는 가름대(girder)에 너트로 고정하여 모래기둥의 상부위치를 잡도록 하였다.

이렇게 주형을 만든 다음 철강 파이프와 모래기둥 사이의 공간에 현무암 용융액을 부어서 현무암 튜브를 주조하였다. 이 때 주조물을 소둔로에 넣어 열처리 과정을 거치게 하였다. 이는 2장에서 언급한 용융 주조물의 결정화 과정에 관한 이론을 참고하였다.

주형에 용융액을 붓고 철강 파이프에 있는 볼트를 풀어서 파이프를 두 조각

으로 분리하여 떼어낸 다음 가름대(girder)와 바닥판(bottom disk)의 스테드 볼트에 끼워져 있는 너트를 풀어낸다. 그러면 가름대와 바닥판을 분리해 낼 수 있고 주물사를 털어 낼 수가 있다. 그 후 **Fig. 4.11** 열처리 소둔로에서 20시간 이상의 열처리 시간이 흐른 다음 용융주조 현무암 튜브를 제작하였다.

Fig. 4.10은 현무암 엘보우를 주조하는 설명도이다. 모양만 다를 뿐 **Fig. 4.9**의 현무암 튜브 만들 때와 같은 요령으로 주조하였다.

Photo 4.2는 주형에다가 가스로의 현무암 용융액을 붓고 있는 장면이고 **Photo 4.3**은 주조된 현무암 튜브이다.

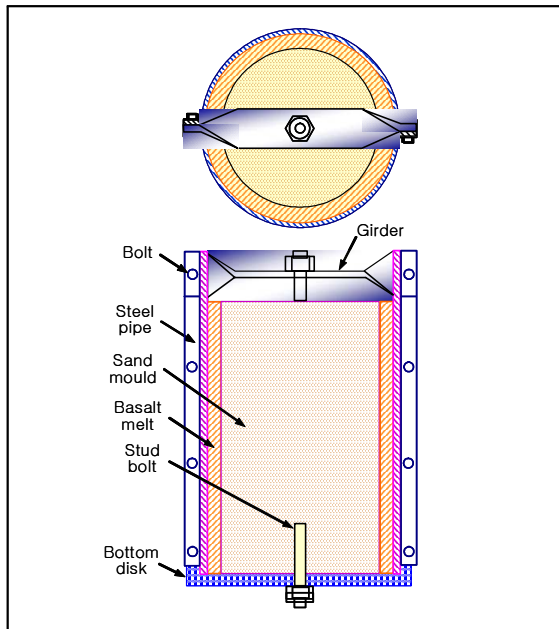


Fig. 4.9 Casting mold of basalt tube

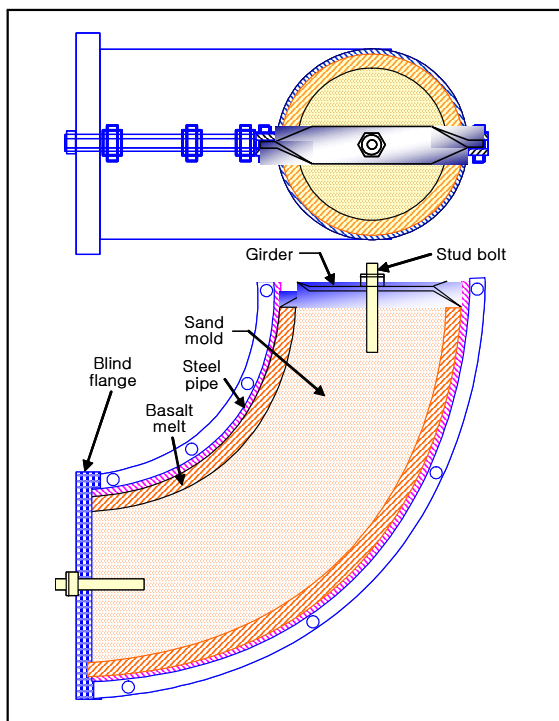


Fig. 4.10 Casting mold of basalt elbow

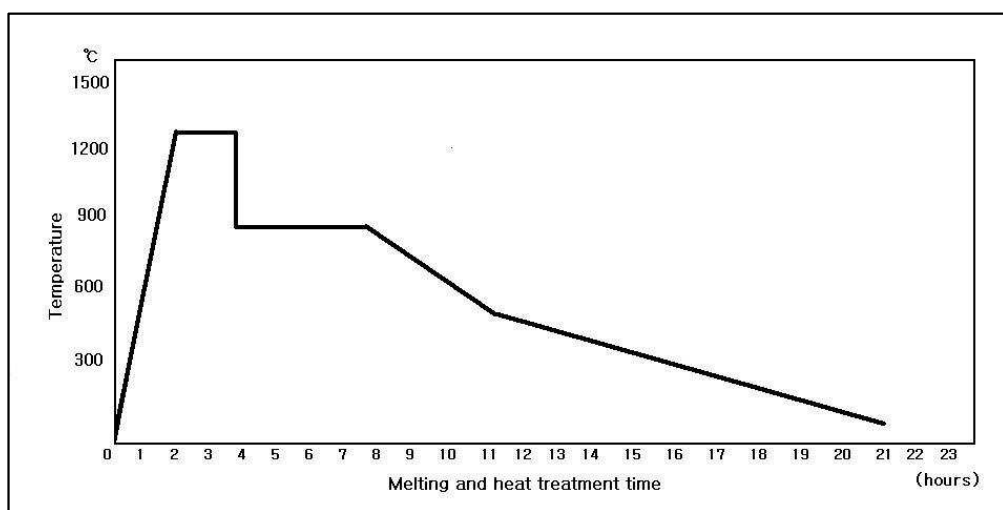


Fig. 4.11 The pattern of melt and heat treatment for fused cast basalt tube



Photo 4.2 Casting of melting basalt



Photo 4.3 Basalt tube

4.2.2 복합재료 파이프

현무암 튜브를 주조하고 이것을 철강 파이프내에 삽입하여 모르타르로 접착시켜 철강-용융주조 현무암 복합재료 파이프를 제작하였다. **Fig. 4.12**은 이 복합재료 파이프를 제작하는 설명도이다. 철강 파이프(steel pipe)를 하부 블라인드 플레이트(lower blind plate)위에 세우고 플렌지의 볼트를 체결한다. 하부 블라인드 플레이트에는 모르타르를 주입할 수 있는 니플(nipple)을 그림에 보인 바와 같은 위치에 설치하고, 현무암 튜브가 철강 파이프와 동심원 상에 자리 잡을 수 있도록 턱을 설치하였다. 그런 다음 현무암 튜브를 철강 파이프 안에 끼우는데 하부 블라인드의 턱에 걸치도록 하여 철강 파이프와 동심원 상에 놓이도록 하였다. 그런 다음 상부 블라인더 플레이트를 덮고 플렌지 볼트를 체결하였다.

이 상부 블라인더 플레이트에도 니플을 설치하여 하부에서 펌프로부터 니플을 통하여 모르타르가 주입되면 공기가 빠져 나가도록 하고, 중앙에 턱을 설치하여 현무암 튜브가 제자리를 잡는데 도움을 주었다. 이렇게 한 다음 하부로부터 펌프를 이용하여 모르타르를 주입하는데 공기배출(air vent)구멍으로부터 모르타르가 나올 때까지 충분히 주입하였다.

Fig. 4.12은 엘보우 복합재료 파이프를 제작하는 설명도이다. 구부러진 것을 제외하고는 전자와 같은 요령이다.

Photo 4.4은 철강 파이프에 현무암 튜브를 삽입하고 제자리를 잡기 위하여 간격을 조정하는 사진이고 **Photo 4.5**는 철강 파이프와 현무암 튜브사이의 간격을 조정하고 나서 상부 블라인드 플레이트를 덮은 사진이다. **Photo 4.6**은 완성된 시제품을 나타낸다. 직선 파이프와 엘보우를 하나씩 제작하였다. 사진이 선명하게 나타나도록 하기 위하여 현무암 부분을 흑색, 모르타르 부분을 노란색 그리고 연강부분을 회색으로 도색하였다.

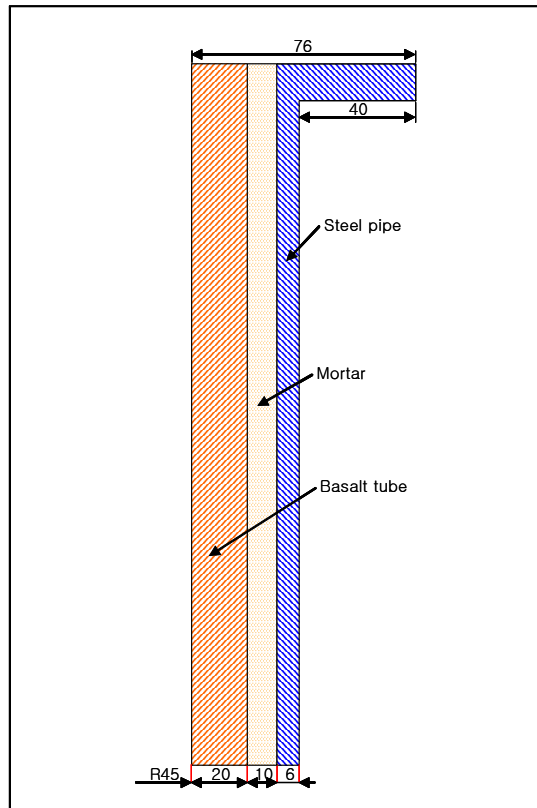


Fig.4.12 Pumping of mortar between steel and basalt pipe

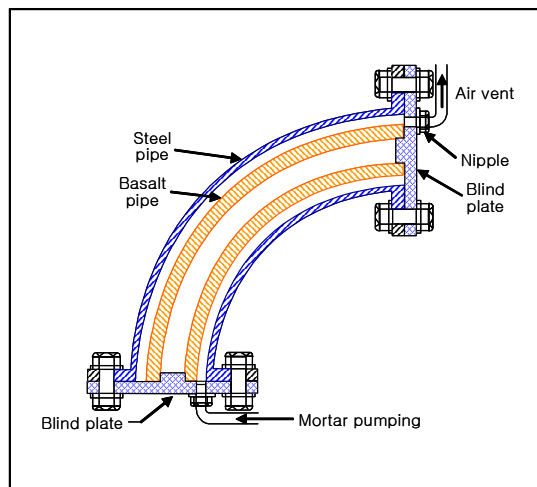


Fig.4.13 Pumping of mortar between steel and basalt elbow

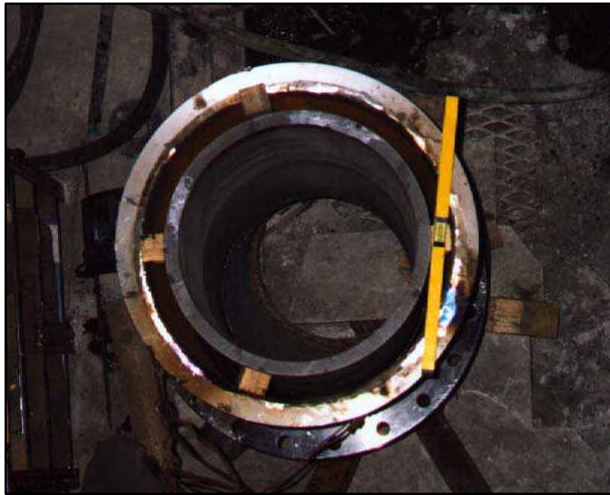


Photo 4.4 Adjustment of clearance between steel and basalt tube

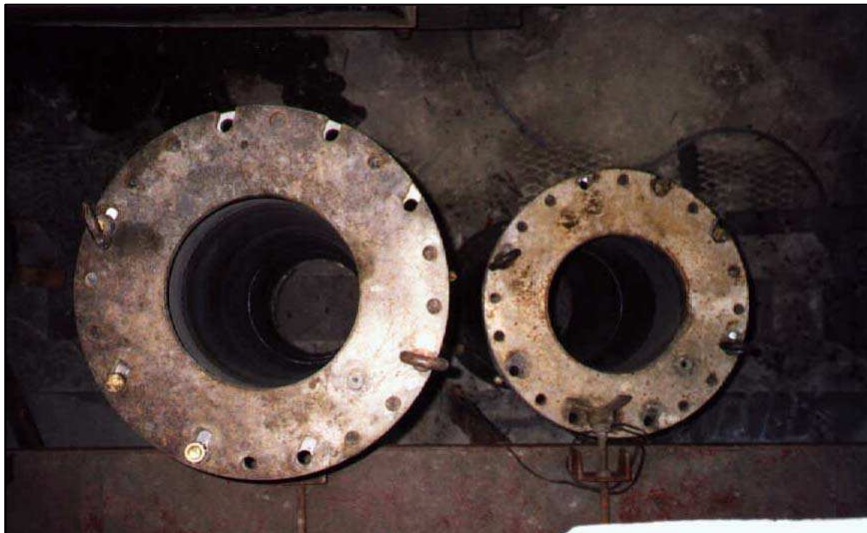


Photo.4.5 Upper blind plates



Photo 4.6 Developed steel-fused cast basalt lined composite pipe and elbow

4.3 복합재료 파이프의 역학적 안전기준

철강-용융주조 현무암 복합재료 파이프가 선박의 해수계통에 쓰일 때에 손상을 입지 않기 위해서는 어느 정도의 안전 기준을 정할 필요가 있다.

Fig. 4.14은 이 복합재료 파이프가 굽힘모멘트 M 을 받을 때 임의의 수직단면에서의 변형률 상태를 나타낸다. 변형률의 크기는 중립면에서의 거리에 비례하고 중립면 아래에서는 인장, 위에서는 압축변형이 일어난다. 지금 중립면의 곡률반경을 ρ 라 하면 보의 굽힘이론에 의하여 중립면의 곡률 $1/\rho$ 은 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E_s I_s + E_m I_m + E_b I_b} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

여기서 M 은 굽힘모멘트이고 E_s , E_m , E_b 는 각각 연강, 모르타르, 현무암의 탄성계수이며, I_s , I_m , I_b 는 각각 연강, 모르타르, 현무암의 단면 2차모멘트로 연강과 이프의 외경과 내경을 각각 D_s , D_{si} , 현무암 튜브의 외경과 내경을 각각 D_b , D_{bi} 라고 하면 다음과 같이 된다.

$$I_s = \frac{\pi(D_s^4 - D_{si}^4)}{32} \quad I_m = \frac{\pi(D_{si}^4 - D_b^4)}{32} \quad I_b = \frac{\pi(D_b^4 - D_{bi}^4)}{32} \quad (4.2)$$

현무암은 연강에 비하여 취약하고 또한 보통의 취성재료와 같이 압축응력에는 강한 반면, 인장응력에 약하므로 현무암 튜브에 발생하는 인장응력만 검토하면 된다. 현무암 튜브에 발생하는 인장응력은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_b = \frac{E_b M y}{E_s I_s + E_m I_m + E_b I_b} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

여기서, y 는 중립면으로부터의 거리이다. 현무암 튜브에 발생하는 최대인장응

력 σ_{bmax} 는 위의 식에서 $y=D_b/2$ 를 대입하면 된다.

$$\sigma_{bmax} = \frac{E_b M D_b / 2}{E_s I_s + E_m I_m + E_b I_b} \dots\dots\dots (4.4)$$

일반적으로 모르타르의 탄성계수 E_m 은 연강이나 현무암의 그것에 비하여 아주 작으므로(연강의 1/10이하) 이것을 무시하면 현무암에 발생하는 최대인장응력은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_{bmax} = \frac{E_b M D_b / 2}{E_s I_s + E_b I_b} \dots\dots\dots (4.5)$$

이 값이 현무암의 인장강도 45MPa를 넘지 않아야 되므로 결국 이 복합재료 파이프에 가할 수 있는 굽힘모멘트 M 은 다음과 같이 제한되어야 하고

$$M \leq \frac{90(E_s I_s + E_b I_b)}{D_b E_b} (Nmm) \dots\dots\dots (4.6)$$

곡률반경 ρ 는 다음 식 이상이어야 한다.

$$\rho \geq \frac{D_b E_b}{90} (mm) \dots\dots\dots (4.7)$$

예로서 시제품의 경우 $D_s=162mm$, $D_{si}=150mm$, $D_b=130mm$, $D_{bi}=90mm$ 이고 탄성계수는 $E_s=200GPa$, $E_b=110GPa$ 이므로 이 수치들을 위의 식들에 대입하여 계산하면, 굽힘모멘트 M 은 37.5kNm이하이어야 하고 곡률반경 ρ 는 158.89m이상이어야 한다는 것을 알 수 있다.

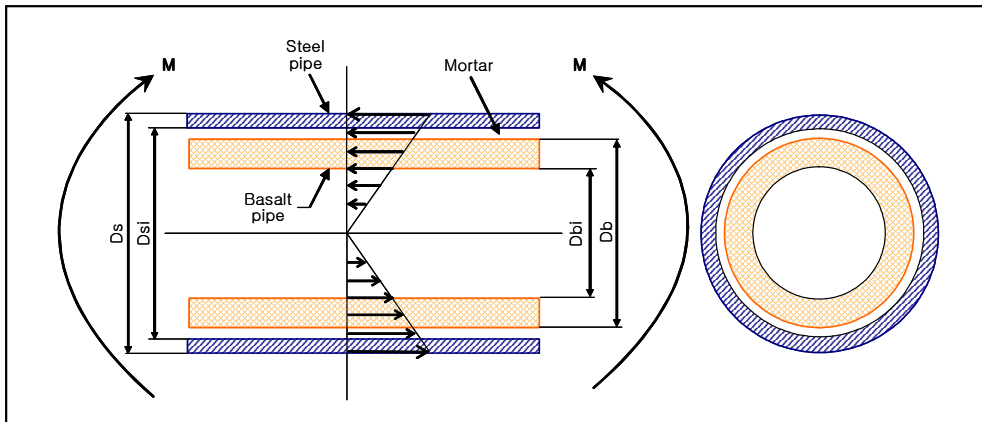


Fig. 4.14 Bending stress of steel-fused cast basalt lined composite pipe

4.4 복합재료 파이프의 열응력 특성

다음으로 열팽창 수축에 의한 사용온도를 검토하여 보자. 앞서서도 언급하였듯이 현무암의 열팽창계수는 연강의 2/3 수준으로 연강과 현무암 사이에는 열팽창-수축의 차이가 있으므로 온도가 변화하면 연강과 현무암의 팽창-수축이 같을 수가 없다. 따라서 온도 변화에 대한 연강과 현무암의 접착 상태를 검토할 필요가 있다.

만약 온도가 내려가면 연강과 현무암이 동시에 수축하는데, 이때 연강의 수축이 현무암의 수축보다 크다. 그러면 연강 파이프에는 인장응력이 발생하고 모르타르와 현무암 튜브에는 압축응력이 발생한다. 연강은 인장에 강하고 모르타르와 현무암은 압축에 강하므로 온도가 내려갈 때에는 문제가 생기지 않는다. 그런데 이와는 반대로 온도가 올라 갈 때에는 연강의 팽창이 현무암의 팽창보다 크게 되므로 연강 파이프와 현무암 튜브사이의 간격, 즉 모르타르의 두께가 커지게 되는데, 모르타르는 인장에 약하므로 온도의 증가가 어느 한도를 넘으면 접착을 유지할 수 없게 된다. 지금 이 온도증가 한도를 구하여 보고자 한다.

모르타르의 두께는 $t_m = (D_s - D_b)/2$ 인데 온도가 T 만큼 증가하면 두께는 다음과 같이 된다.

$$t_m' = \frac{D_{si}(1 + \alpha_s T) - D_b(1 + \alpha_b T)}{2} \dots\dots\dots (4.8)$$

여기서 α_s, α_b 는 각각 연강과 현무암의 열팽창계수이다. 모르타르의 탄성계수 E_m 이 연강이나 현무암에 비하여 작으므로 모르타르의 두께방향 변형율은 다음과 같이 된다.

$$\varepsilon_{mr} = \frac{D_{si}\alpha_s - D_b\alpha_b}{D_{si} - D_b} T \dots\dots\dots (4.9)$$

그러므로 모르타르의 두께방향 응력은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_{mr} = E_m(\varepsilon_{mr} - \alpha_m T) = E_m \left(\frac{D_{si} \alpha_s - D_b \alpha_b}{D_{si} - D_b} - \alpha_m \right) T \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

여기서 α_m 은 모르타르의 열팽창계수이다. 이 식으로 계산된 응력이 모르타르의 인장강도 σ_{mf} 를 넘지 않아야 한다. 따라서 온도증가 T 는 다음 식으로 계산된 값으로 제한하여야 한다.

$$T \leq \frac{\sigma_{mf}}{E_m} \frac{(D_{si} - D_b)}{D_{si}(\alpha_s - \alpha_m) - D_b(\alpha_b - \alpha_m)} \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

예로서 시제품의 경우를 들어보자.

$$D_{si} = 150 \text{ mm}, \quad D_b = 130 \text{ mm}, \quad \alpha_s = 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}, \quad \alpha_b = 8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\alpha_m = 9.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}, \quad E_m = 20 \text{ GPa}, \quad \sigma_{mf} = 30 \text{ MPa}$$

의 예를 위의 식(4.11)에 대입하면 $T \leq 52.63^\circ\text{C}$ 가 나온다. 즉, 상온(20°C)에서 이 복합재료 파이프를 제작하였다면 사용온도를 72.63°C 이하로 제한하여야 한다는 것을 알 수 있다.

이상은 철강 파이프와 모르타르 및 현무암 튜브에 똑같이 온도가 상승할 때, 온도상승의 제한치를 계산한 것이다. 그런데 찰강-현무암 복합재료 파이프가 선박에서 사용될 때에 파이프 내에 흐르는 유체와 외부의 온도차가 생길 수도 있다. 이럴 경우 이 복합재료 파이프의 안전성을 검토할 필요가 있다. 파이프 내에 흐르는 유체의 온도가 외부의 온도보다 높을 때는 현무암 튜브에 압축응력이 생기고 철강 파이프에 인장응력이 생긴다. 현무암은 압축응력에 강하고 연

강은 인장응력에 강하기 때문에 이럴 경우에는 전혀 문제가 되지 않는다. 이와는 반대로 복합재료 파이프 안에 흐르는 유체가 외부의 온도보다 낮을 때는 현무암 튜브에 인장응력이 생기고, 현무암은 인장응력에 약하므로 문제가 된다. 이때에 현무암 튜브에 발생하는 인장응력이 어느 한도를 넘으면 현무암이 깨어진다는 사실을 감안하여 파이프 내부와 외부의 허용온도차를 결정하고 이 차를 초과하지 않도록 해야 한다.

4.5 복합재료 파이프의 반경 방향별 온도분포

원통좌표계로 표시한 축대칭 물체의 정상상태 열전도 방정식을 세워서 이것을 풀고, **Fig. 4.15(a)**와 같이 내반경이 α , 외반경이 β 인 실린더에 적용하여보자. 이 실린더 내벽의 온도가 T_A , 외벽의 온도가 T_B 일 때, 원통좌표계를 이 그림과 같이 정하고 온도분포 $T(r)$ 를 구하면 아래 식과 같이 된다.

$$T(r) = \frac{1}{\ln(\frac{\beta}{\alpha})} (T_A \ln \frac{\beta}{r} + T_B \ln \frac{r}{\alpha}) \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

이것을 미분하면 r 에 관하여 r 방향의 온도기울기를 구할 수 있다.

$$\frac{dT}{dr} = \frac{-T_A + T_B}{\ln \frac{\beta}{\alpha}} \frac{1}{r} \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

이들을 이용하면 **Fig. 4.15(b)**와 같이 철강·현무암 복합재료 파이프 내벽의 온도가 T_i , 외벽의 온도가 T_o 로 정상상태의 열전도가 이루어질 때 온도분포를 구할 수 있다. k_b , k_m , k_s 를 각각 현무암, 모르타르, 연강의 열전도계수라고 할 때, 현무암과 모르타르의 계면에서의 온도 T_1 , 모르타르와 연강과의 계면에서의 온도 T_2 를 구하여 보자. 두 물체의 경계면에서 좌측 물체의 열전도계수와 온도 기울기의 곱과 우측 물의 그것이 같다는 사실을 이용하면 T_1 과 T_2 를 구할 수 있고 다음과 같이 된다.

$$T_1 = \frac{(\frac{k_s}{k_m} \ln \frac{c}{b} + \ln \frac{d}{c}) T_i + (\frac{k_s}{k_b} \ln \frac{b}{a}) T_o}{\ln \frac{d}{c} + \frac{k_s}{k_m} \ln \frac{c}{b} + \frac{k_s}{k_b} \ln \frac{b}{a}} \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

$$T_2 = \left(1 + \frac{k_b}{k_m} \frac{\ln \frac{c}{b}}{\ln \frac{b}{a}}\right) T_1 - \frac{k_b}{k_m} \frac{\ln \frac{c}{b}}{\ln \frac{b}{a}} T_i \quad \dots\dots\dots (4.15)$$

여기서 a , b 는 각각 현무암 튜브의 내반경과 외반경으로 $a=D_{ti}/2$, $b=D_b/2$ 이고 c , d 는 각각 연강파이프의 내반경과 외반경으로 $c=D_{si}/2$, $d=D_s/2$ 이다. 따라서 현무암 튜브에서의 온도분포는 식 (4.11)을 이용하여 구하면

$$T(r) = \frac{1}{\ln \frac{b}{a}} \left(T_i \ln \frac{b}{r} + T_1 \ln \frac{r}{a} \right) \quad \dots\dots\dots (4.16)$$

단, $a \leq r \leq b$

와 같이 되고 모르타르에서의 온도분포는

$$T(r) = \frac{1}{\ln \frac{c}{b}} \left(T_1 \ln \frac{c}{r} + T_2 \ln \frac{r}{b} \right) \quad \dots\dots\dots (4.17)$$

단, $b \leq r \leq c$

와 같이 되며 연강파이프에서의 온도분포는 다음과 같이 된다.

$$T(r) = \frac{1}{\ln \frac{d}{c}} \left(T_2 \ln \frac{d}{r} + T_o \ln \frac{r}{c} \right) \quad \dots\dots\dots (4.18)$$

단, $c \leq r \leq d$

시제품을 예로 들어 계산을 하면 $a=45\text{mm}$, $b=65\text{mm}$, $c=75\text{mm}$

$d=81\text{mm}$, $k_b=1.9\text{W}/(^{\circ}\text{Cm})$, $k_m=1.2\text{W}/(^{\circ}\text{Cm})$, $k_s=40\text{W}/(^{\circ}\text{Cm})$ 이고 내부의 온도가 5°C , 외부의 온도가 50°C 라고 할 때에 계면에서의 온도 T_1 과 T_2 를 식 (4.13)과 식 (14)을 각각 이용하여 계산하면 $T_1=32.67^{\circ}\text{C}$, $T_2=49.73^{\circ}\text{C}$ 가 되고 온도분포를

그래프로 나타내면 **Fig. 4.16**와 같다.

복합재료 파이프의 온도 분포를 구하였던 이유는 이것을 이용하여 열응력을 구하고 현무암에서 제한치 이상의 인장응력이 발생하는가를 검토하기 위해서이다. 현무암과 모르타르 및 연강의 기계적 성질이 다 상이하므로 열응력의 계산식을 유도하기는 어렵고 유한요소법을 이용하는 수밖에 없다.

Fig. 4.17은 본 시제품의 열응력 계산을 위한 유한요소 분할을 나타낸다. 반경방향으로는 2mm 간격, 축 방향으로는 4mm 간격으로 요소를 분할하였다. 복합재료 파이프의 내벽과 외벽의 온도는 전과 같이 각각 5℃와 50℃의 정상상태에서의 열응력을 계산하였다.

열응력의 분포를 보면 축 방향(z방향)으로는 변화가 거의 없고 반경 방향(r방향)으로만 변화가 있었다. **Fig. 4.17**은 열응력의 분포를 나타낸다. 반경방향 응력 σ_r 는 그 크기가 미미하여 무시하여도 좋을 듯하다. 원주방향 응력 σ_θ **Fig. 4.17**

을 보면 현무암 튜브의 내벽에서 현무암의 인장강도(45MPa)에 육박하는 응력이 발생한다는 것을 볼 수가 있다. 축 방향 응력 σ_z 는 더 심각하다는 것을 알 수 있다.

현무암과 모르타르, 모르타르와 연강의 경계에서 응력의 분포가 급변하는 것은 탄성계수와 열팽창계수와 같은 두 물체의 기계적 성질이 매우 상이하기 때문이다. 이 계산을 토대로 하여 보면 본 시제품의 경우 파이프 내벽의 온도가 외벽의 온도보다 45℃ 이상 낮으면 현무암 튜브가 깨어질 있다는 것을 염두에 두어야 한다.

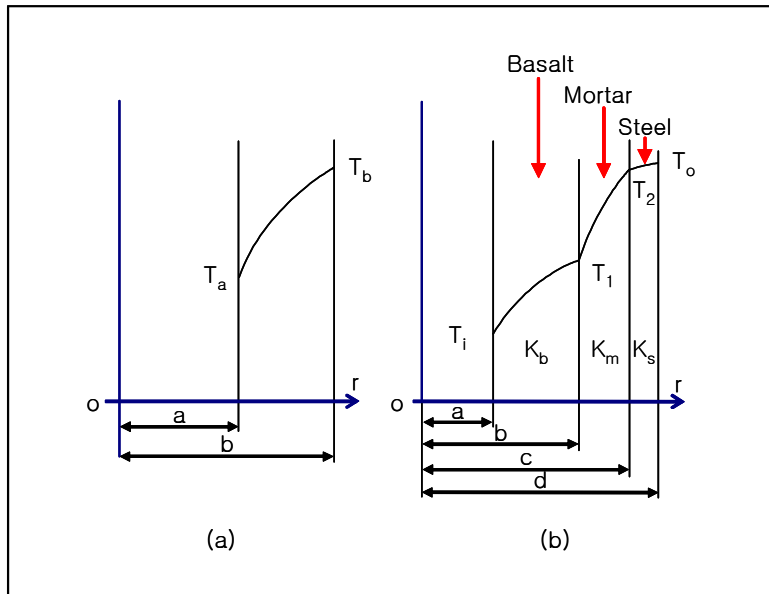


Fig. 4.15 Temperature distribution of cylinder wall in case of steady state heat conduction

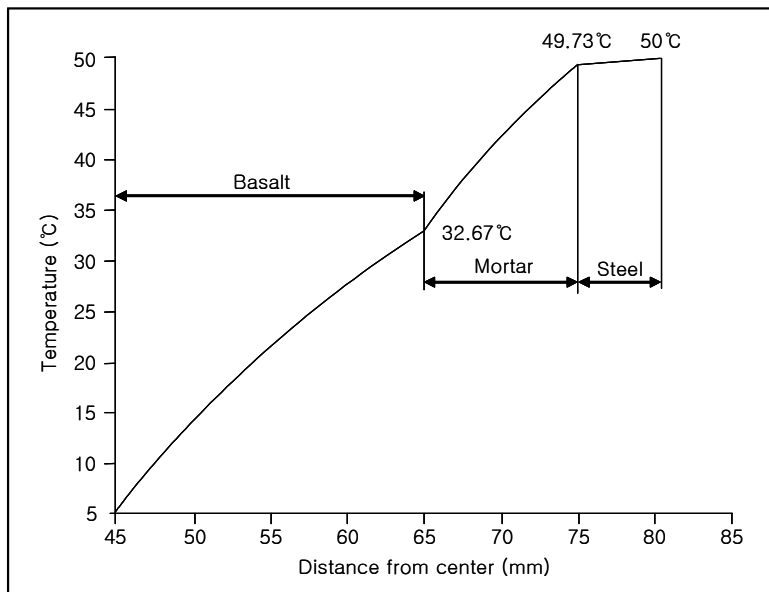


Fig. 4.16 Temperature distribution of steel- fused cast basalt composite pipe in case of steady state heat conduction

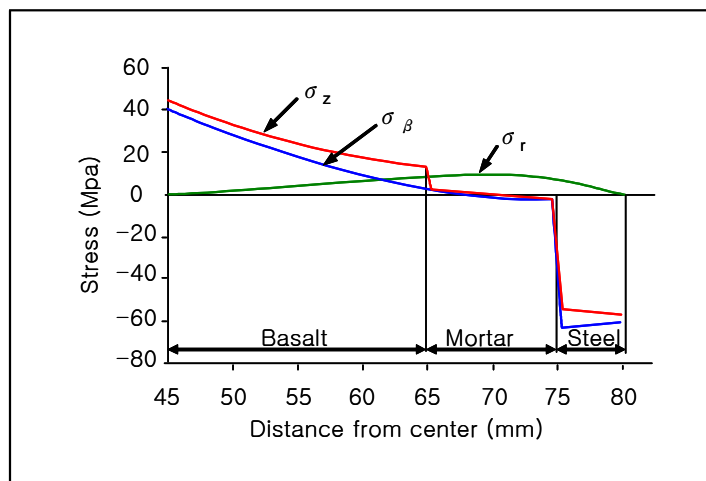


Fig 4.17 Thermal stress distributions of steel-fused cast basalt lined composite pipe

4.6 복합재료 파이프의 절연저항과 굽힘응력

철강-용융주조 현무암 복합재료 파이프를 선박의 해수계통에 적용하려고 하는 이유는 해수가 연강에 접촉하면 전해작용에 의하여 연강이 부식되기 때문이다. 따라서 본 시제품이 해수를 이송하는데 쓰여도 해수와 연강 파이프가 접촉하지 않는다는 것을 확인할 필요가 있다.

이를 위하여 본 시제품의 한쪽 끝을 블라인더 플레이트로 폐쇄하고 세운 다음, 3%의 소금물(해수)을 채우고 이 소금물과 연강 파이프 사이의 절연저항을 측정하였다.

Photo 4.7은 절연저항을 측정하는 모습이다. 플렌지를 이용하여 파이프와 엘보우의 연결을 위하여 개스킷을 대고 볼트로 체결하였고, 엘보우의 다른 끝을 역시 개스킷을 대고 블라인더 플레이트와 볼트로 폐쇄하였다. 그런 다음 소금물을 채우고 절연저항을 측정하였다. 측정 결과, 공업적으로 절연체라고 인정하는 저항인 $3M\Omega$ 이상으로 측정되어 해수와 연강 파이프의 접촉이 없다는 것을 확인할 수 있었다.

여기서 개발한 복합재료 파이프가 굽힘 모멘트를 받을 때의 굽힘응력을 측정하여 계산치와 비교하여 보았으며, 또한 현무암 튜브를 삽입하지 않았을 때의 응력 계산치와도 비교하여 보았다.

Photo 4.8은 이 연구에서 제작한 복합재료 파이프의 표면에 있는 도료를 긁어낸 다음 샌드페이퍼로 문지르고 표면처리를 하여 스트레인 로제트를 붙인 상태를 나타낸다.

Photo.4.9는 파이프에 굽힘모멘트를 가하기 위하여 파이프를 단순보로 만들고 여기에 하중을 가하는 장면이다. 하중은 추를 이용하여 가하였는데, 용량 500kgf의 로드셀을 경유하여 인가하였다. 추를 올려놓기 전에 로드셀의 영점조정을 한 다음, 추를 하나하나 올려 가면서 하중의 증가에 따르는 스트레인 로제트(strain roset)의 신호를 검출하여 스트레인 증폭기(strain amplifier)를 경유, 컴퓨터의 데이터 수집시스템(data acquisition system)에 입력신호로 사용하였다. 스트레인 로제트는 San-ei사 제품으로 형식번호 N31-FA-8-120-11을 사용하

였고, 스트레인증폭기는 Senstech사 제품으로 모델번호 ST-AM300(9 채널)이었으며, 데이터수집시스템은 Advantech사 제품으로 형식번호 PCI-1710이었다. 또한 로드셀은 DANA사 제품으로 형식번호 UU-K500 이었으며 하중 지시기는 Senstech사 제품 형식번호 FS-1010이었다.

Fig. 4.18은 인가된 하중과 측정된 굽힘응력의 관계를 나타낸다. 이들 관계는 거의 선형관계를 유지하고 있다는 것을 보여준다. 이 그림에서 점선은 같은 크기의 철강 파이프인 경우 추의 무게와 굽힘응력과의 관계를 계산으로 나타낸 것이고, 실선은 철강-용융주조 현무암 복합재료 파이프의 경우 추의 무게와 굽힘응력의 관계를 계산으로 나타낸 것이며 점은 실측치를 나타낸다. 실측치가 비교적 계산치에 근접하기는 하나 일반적으로 약간 작게 나오는 것은 모르타르의 영향 때문으로 추측된다.



Photo 4.7 Insulation test of steel-fused cast basalt lined composite pipe

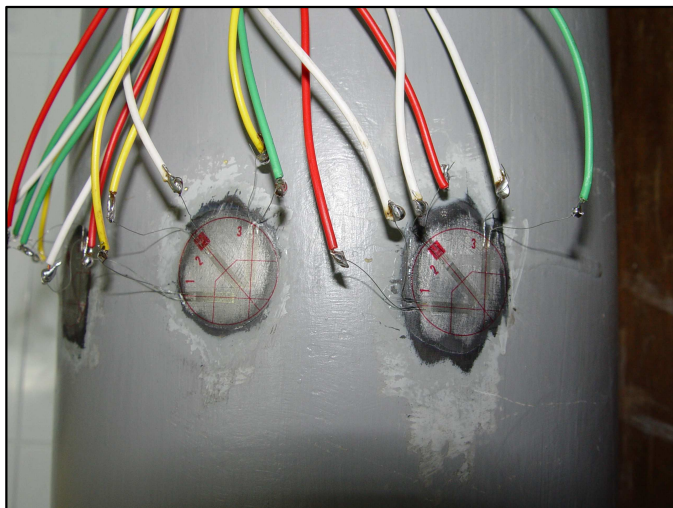


Photo 4.8 Strain rosettes on the steel-fused cast basalt lined composite pipe

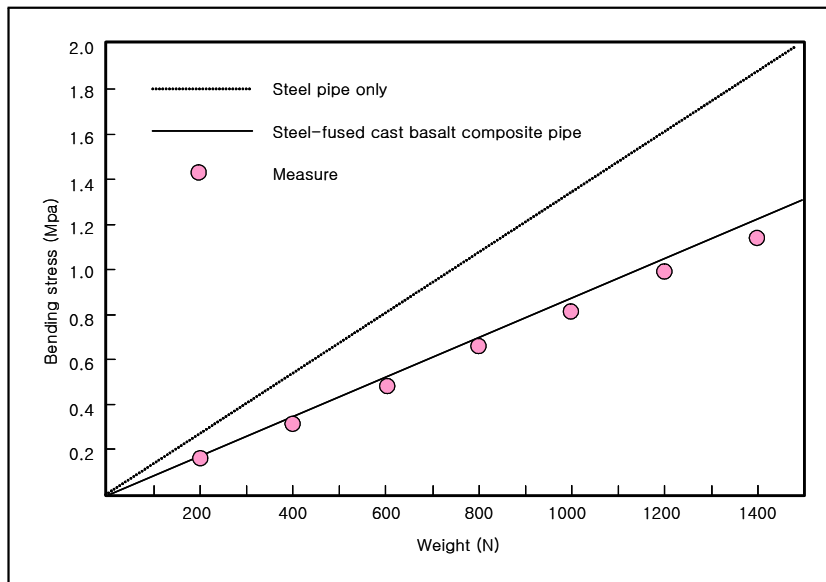


Fig 4.18 Bending stress according to weight

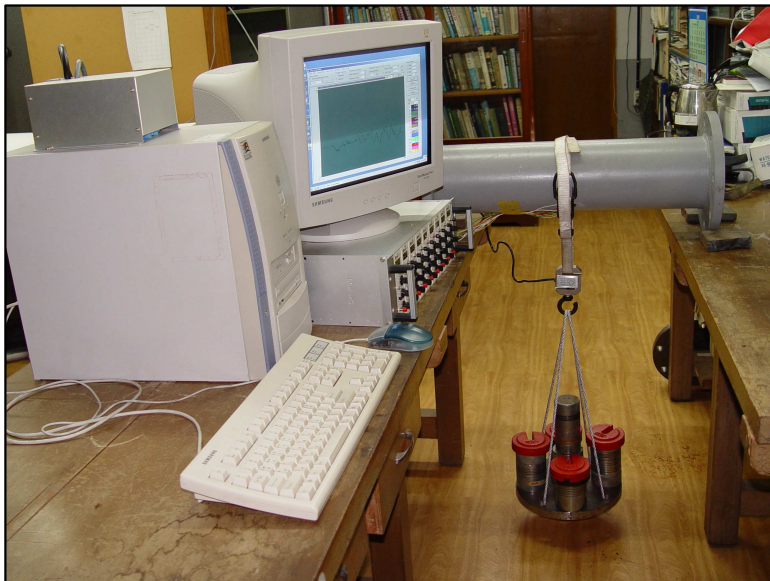


Photo 4.9 Bending test of the steel-fused cast basalt lined composite pipe

5. 결론

해수를 이송하는 배관에 있어 가장 큰 문제는 부식에 따른 배관의 수명이 길지 않음에 있다. 갈수록 선박의 대형화 및 고급화에 따라 선박의 가격이 고가 격화 됨에 따라 가동 능력을 최대한 높일 수 있는 재료의 파이프 라인이 필요로 하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 선박의 수명주기까지 보수나 교체없이 영구적으로 사용할 수 있는 복합재료 파이프를 실험·연구한 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- (1) 양질의 천연 현무암을 선택할 수 있는 조건들을 살피고 원료의 지역별 특성들과 가장 적합한 용융, 주조, 열처리 과정에 관한 연구를 한 결과, 화학조성이 SiO_2 성분이 44~47wt.%이고 주요 광물성분인 휘석(Pyroxene) 55vol.%인 천연현무암이 가장 우수한 공업재료임이 확인되었다. 암석의 융점은 1,200℃이나 용탕의 흐름을 좋게 하기 위해 1280℃로 용융한 후, 튜브와 엘보 형상으로 주물하여 내식성과 내마모성이 우수한 용융주조 현무암을 개발하였다.
- (2) 주형에서 탈형시킨 주조물은 더욱 단단하고 치밀한 결정구조를 갖게 하기 위하여, 1차 결정시에는 무방향성 스켈리톤과 텐드라이트의 결정 구조를 가지게 하였다. 2차 결정화는 풀림로(annealing furnace)에서 850℃부터 상온까지 하였다. 약 20시간 동안 서냉시켜 자철석을 핵으로 하는 구형의 단사정계 휘석이 생성되도록 하였으며, 그 주변에는 잔류 감람석의 유리상이 결정면을 결합시켜 강성의 천연 현무암보다 우수한 물리적 성질을 가지게 하였다.
- (3) 사용재료의 물리적 특성을 시험한 결과, 3점 굽힘시험은 상온에서 42.9~53.8 MPa, 200℃에서 29.2~43.9MPa 그리고 300℃에서 11.5~30.8MPa를 나타내었으며,

압축강도 339~358MPa, 굽힘강도 79.3~99.7MPa, 흡수율(absorption rate) 0.05~0.06%, 경도 703~727Hv0.2 그리고 24시간동안 염수분무시험한 결과 녹 발생이 없었으며 표면건조포화상태로 비중 2.87의 값을 얻었다.

- (4) 용융주조 현무암 튜브를 철강재 파이프 내부에 삽입하여 철강-용융 주조 현무암 복합재료 파이프를 만드는데 성공하였다. 또 철강재 파이프와 현무암 파이프 사이에 확실한 밀착을 위하여 모르타르를 주입하여 양생 시켰는데, 이 때 모르타르는 포틀랜드 시멘트에 세일콘을 혼합함으로 주입 시 유동성이 증가 되었으며, 시멘트 양생시 발생하는 수축을 방지할 수 있었다. 또한 모르타르의 주입 방법은 하부에서 상부로 주입함으로 모르타르 내에 발생할 수 있는 기포를 근본적으로 방지하였다.
- (5) 선박의 해수라인에 사용 시 역학적으로 파괴되지 않는 최대 굽힘 모멘트는 본 연구에서 개발한 시제품의 경우 37.5kNm였으며, 이 때 철강-용융주조 현무암의 최대 곡률반경은 158.89m 이었다.
- (6) 용융주조 현무암의 열팽창계수는 철강의 2/3 수준으로 내부 또는 외부의 온도구배에 따른 열팽창과 수축을 달리하게 됨으로써 온도변화에 따른 접착상태를 연구한 결과, 온도가 하강할 때에는 철강과 현무암이 동시에 수축하는데 철강은 인장응력에 강하고 모르타르와 현무암은 압축응력에 강하므로 결함이 발생하지 않으나, 이와는 반대로 온도가 상승할 때에는 철강의 팽창이 현무암보다 크게 됨으로써 모르타르의 접착한계를 넘어선다. 따라서 파이프 내부와 외부의 온도편차에 따라서 현무암 튜브의 인장응력의 한계를 넘어서는 최대 온도를 72.63℃로 제한하였다.
- (7) 철강-용융주조 현무암 복합재료 파이프에서 현무암 튜브, 모르타르 및 철강 파이프는 반경별 서로 다른 온도 분포를 가진다. 이에 대한 해석을 통하여

제한치 이상의 열응력으로 인한 현무암 튜브의 파손을 방지하기 위하여 외벽과 내벽의 온도차가 45℃ 이하로 제어되어야 하였다.

(8) 철강-용융주조 현무암 복합재료 파이프내에 3%의 해수를 채우고 해수와 철강사이의 절연저항 측정시험을 실시한 결과, 공업적으로 절연체라고 인정하는 3MΩ 이상으로 측정되었다. 따라서 해수가 철강 파이프에 직접 접촉하지 않는다는 것을 확인하였으며, 선박용 해수라인용 파이프로의 가능성을 제시하였다.

(9) 지금까지의 연구 결과로부터 철강-용융주조 현무암 복합재료 파이프의 양산체제하에서는 현무암 튜브의 두께, 모르타르의 두께, 연강 파이프의 두께와 직경, 내경과 외경, 플랜지의 크기, 볼트구멍의 위치와 수, 엘보우의 곡률반경 등을 규격화하여 일정하게 생산하면 호환성이 있으므로 상품성이 더 좋게 되어 사용범위가 더 넓어 질것이고 육상용으로도 사용 가능할 것이 기대된다. 즉, 이 파이프의 우수한 내마모성을 육상의 일반 산업에 이용하는 효과도 있을 것으로 기대된다. 예를 들면 시멘트나 곡물 또는 광석분말을 이송하는 파이프에 활용할 수 있을 것이다. 특히 이런 고품분말을 이송하는 파이프는 엘보우와 같은 곡각 부분에서 마모가 심하므로 이런 개소에 이 파이프를 사용함으로써 현무암의 내마모성이 철강재 파이프를 보호하여 파이프가 마모되지 않으므로 수명이 현저하게 증가하는 효과가 있을 것으로 기대되어 이 파이프의 활용도를 극대화할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. R.N. McNALLY & G.H. BEALL, "Crystallization of fusion cast ceramics and glass-ceramics", Journal of materials science, 14(11), (1979), pp2596-2604
2. Lubomir Kopecky & Jan Voldan, "The Cast basalt Industry", Annals New York Academy of Sciences, pp. 1086-1105
3. Lubomir Kopecky, "50 YEARS OF FUSED BASALT PRODUCTION IN STARA VODA", EUTIT, pp. 37-57, (2001)
4. 김동섭, "탈황설비 내 배관의 부식과 마모를 방지하는 용융주조 현무암 TUBE를 강관에 삽입하는 복합 PIPE", 한국기술거래소 pp. 23~29, (2003)
5. 최백남, "엘보우관의 보강구조", 실용등록 2001-276989, (2001)
6. 한석우, "내식성의 엘보의 제조장치", 특허공개 2001-111390, (2001)
7. 미이클윌터카터, "내마모성 비선형 파이프", 미국특허 US535516, (1983)
8. 오오가도모코, "내마모성 파이프 및 그 제조방법", 일본특허 JP61-93939, (1993)
9. Ogawa Hiroyuki, Ishitsuka Tetsuo, Denpo Kozo, Miyasaka Akihiri & Ito Michihisa, "Alloy and composite steel tube with corrosion resistance in combustion environment where vanadium sodium sulphur and chlorine are present", EUROPEAN PATENT SPECIFICATION EP 0492517B1, (1992)
10. Kuhara Akio, Yoshidake Akira, Torigoe Takeshi & Amako Ghinji, "Composite pipe having excellent corrosion resistance and mechanical properties to withstand high temperatures and high pressures", EUROPEAN PATENT SPECIFICATION EP 0399071B1, (1989)
11. Jonas Rosen, "Composite tube", United States Patent Number US 005324595A, (1994)
12. 정병욱, "플랜트용 라이닝관 구조", 특허공개 98-10088, (1998)

13. 박현우, "내식성 라이닝철간 및 그 제조방법", 특허공고 92-8923, (1992)
14. 정한진, "관계내면의 수지라이닝 방법", 특허공고 95-12871, (1995)
15. 유인배, "내마모라이닝재의 세라믹타일 접합구조", 실용공개 99-4248, (1999)
16. GREENBANK CAST BASALT ENG CO LTD, "Improvements in Pipe Bends or Elbows", UK Patent Application GB 2051281, (1981)
17. Lewis Stuart A, "Tiles for lining pipes", UK Patent Application GB 2178500, (1987)
18. 江坂 立美, "耐蝕性樹脂 ライニングパイプ", 特許公報番號 平3-149496, (1991)
19. Hecken Walte & Grüber Alfone, "Rohr mit innenauskleidung, insbes. als Schutz gegen chemische Angriffe bri hohen Betriebsdrücken.", EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG EP 0307609A, (1988)
20. Hahn, Eckart, Dr, "Korrosionsschutzisolierung an einem Metallrohr", Deutsches Patentamt DE 19514190A1, (1996)
21. Tom Hill, Gateshead: Robert James Cummings, Morpeth, both of United Kingdom, "Joining lined pipe items", United States Patent number US 5992897A, (1997)
22. 長谷川 繁夫 & 岩崎 謙二, "気液接觸装置", 特開平9-313923, (1997)
23. 윤희수 & 김환원, "바잘트튜브 보강방법 및 그 보강수단", 특허등록번호 10-2000-0078914, (2000)
24. 임석빈 & 안희정, "바잘트 내장형파이프의 몰탈충진장치 및 그 방법", 특허등록번호 10-2000-0078915, (2000)
25. 윤 희수, "캐스트 바잘트 내장형 파이프", 특허등록번호 10-2001-0008586, (2001)
26. 최형식, "현무암의 점봉특성에 관한 고찰", 대한토목학회지 제39권 제1호 (1991), pp.8-12
27. 이희호, 이학렬, 황운석, 김광근, "부식과 방식의 원리", 도서출판 동화기술, pp. 19, (1999)

28. 이찬식, "천연 해수 중 친환경적인 전착 코팅막의 형성 메카니즘과 특성분석", 한국해양대학교 박사학위논문 pp. 10-38, (2005.2)
29. Don L. Anderson, "Chapter 8. Chemical composition of the Mantle from Theory of Earth", BlackwellScientific Publication, c1989, pp147-175
30. 한국화학시험연구원, "시험성적서-Basalt 화학분석시험", 발급번호 TAT-0825, (2005. 9.13)
31. 한국화학시험연구원, "시험성적서-Basalt 편광분석시험", 발급번호 2006-TAT-1743, (2006.3.20)
32. Eutit, "Cast basalt CATALOGUE SHEET", E-01, (2003), pp 2
33. 한국표준협회, "KS 석재의 압축 강도 시험 방법 KS F 2519", (2000)
34. 한국표준협회, "KS 도금의 내식성 시험 방법 KS D 8334", (2005)
35. 한국표준협회, "KS 금속 재료의 비커스 경도 시험 방법 KS B 2519", (2003)
36. 한국표준협회, "KS 석재의 흡수율 및 비중 시험 방법 KS F 2518", (2005)
37. 한국화학시험연구원, "시험결과통보서-바잘트 라이닝 파이프", 발급번호 2006-TBT-20, (2006)
38. 정철민, 김종수, 채영수, "대형삼축압축시험을 이용한 북제주현무암 사석재의 강도정수 및 전단거동", 한국지반공학논문집 제18권 2호, (2002), pp.147-160
39. 신희덕, "용융현무암의 특성과 활용기술 동향", KISTI 기술뉴스브리프, pp.1-10.
40. 윤성효, 이문원, 고정선, 김영라, 안지영, "청송 주왕산지역 대전사 현무암의 암석화학적 연구", Jour Petrol. Soc. Korea Vol. 9, No.2(2000), pp. 84-98
41. 松島 巖, "부식방식의 실무지식", Ohmsha, (2002), pp. 12-16
42. 박선준, "케미칼탱커의 화물탱크(SUS 304, SUS316)의 부식에 관한 자료", 선급 제38호 (2004),
43. 심종성, "BASALT 섬유를 활용한 콘크리트 구조물의 보강에 관한 기술 개발", (2002),

44. 스가오케이조, "다중 권취된 스테인리스 강관", 특허등록번호 10-366250 (2002)
45. Birgir Jonsson, "TBM Tunnel Spoil for RCC Dams and more Informative Geological Maps", 9th Nordic Aggregate Research Conference, Reykjavik, 12-14 September 2002.
46. RNDr. Lubomir Kopecky, CSc, "Crystallization and properties of basalt castings and the natural basalt from the Slapany deposit", EUTIT 2001

감사의 글

먼저 지금까지 나의 삶의 중심에서 지켜 보호하여 주신 하나님께 감사를 드립니다.

만학의 길을 권유하고 그 도상에서 엄하지만 늘 자상하고 세심한 배려로 지금의 논문이 이루어지기까지 부족한 저를 이끌어 준 김종도 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 왕지석 교수님의 연구과정에서부터 논문지도 및 심사에 이르기까지 많은 격려와 사랑, 이명훈 교수님의 폭 넓은 지도와 학과 수업의 과정에서 논문의 심사에 이르기까지 조언과 격려를 아끼지 않으심에 마음 깊이 감사를 드립니다. 부족한 학문의 배움의 과정에 훌륭한 수업과 본 연구에 깊은 관심을 보여주신 김기준 교수님, 이병우 교수님께도 다시 한번 감사의 인사를 올립니다.

학업기간동안 회사의 여러 가지 바쁜 일정에도 불구하고 포항과 부산의 먼 거리의 학문을 위해 나서는 저에게 언제나 사랑과 격려로 학업을 할 수 있도록 배려를 아끼지 않았던 동도바잘트산업(주)의 윤희수 사장님, 이석재 이사의 따뜻한 후원, 정나영 대리의 도움과 회사의 모든 동료들에게 감사를 드립니다.

체코 용융주조현무암 공장 EUTIT사에 출장 시 마다 기술적 지도와 조언을 아끼지 않았으며, 제5회 국제 용융암석에 초청하여 여러 가지 기술 자문을 하여준 President Mr. Pavel Dragoun, Director Mr. Vladimir Havlicek, Production Director Ladislave Skloch, Quality Director Jan Neustupný 그리고 Manager Mr. Stanislav JILEK와 EUTIT사의 관계자들에게 감사를 전합니다.

연구기간동안 주말과 휴일을 마다 앓고 용융, 주조 및 열처리 실험을 함께한 한국화학시험연구원의 허남정 과장님, 여러 가지 바쁜 업무에도 시험과 분석을 지원하여 준 김복기 과장님, 세라믹 학문에 관한 지도수업과 연구개발에 여러 가지 자문을 주신 포항공대 백성기 교수님과 그 연구실 박사과정의 임윤탁, 윤송학, 정진화, 한희 씨에게도 감사를 드립니다. 그리고 실험과 논문 완성에 이르기까지 적극적으로 도움을 준 이창제, 강운주, 이정환, 광명섭 후배와 함께 학문을 한 성우하이텍 연구원 박 현준 후배, 에너지관리공단의 태경봉 선배님, MS오토텍의 이장수 이사, 레베산업 이상수 동기 등에게도 고마움을 전합니다.

끝으로 생전에 막내아들을 지극히 아끼셨던 고인이 되신 아버님, 지금까지 기도로 늘 자상하게 살피주신 어머니의 사랑, 하루도 빠지지 않고 기도를 해 주신 장모님, 말사위를 아들과 같이 사랑해 주신 고인이 되신 장인어른과 형제 자매들과 조카들에게도 감사사를 드리며, 사랑과 행복의 동반자로 늘 변함없이 기도로 후원한 아내 김정미, 사랑하는 딸 지원, 아들 성봉 그리고 형원이와 함께 기쁨을 나눕니다.

2006년 6월

윤 희 종